

dottoranda
VALERIA CERA

tutor

prof. arch. **MASSIMILIANO CAMPI**

cotutors

prof. **FRANCESCO CUTUGNO,**

prof. arch. **JESUS IGNACIO SAN JOSE ALONSO**

Il rilievo dell'Architettura tra identificazione tipologica e strutturazione semantica

La Certosa di San Lorenzo a Padula nella rappresentazione digitale per il *Cultural Heritage*

La digitalizzazione delle testimonianze del patrimonio costruito ha animato una nuova sfida dell’epoca contemporanea: la creazione di sistemi intelligenti, efficienti e scalabili per l’indicizzazione, l’archiviazione, la ricerca e la gestione delle collezioni digitali e della relativa documentazione. La strutturazione delle informazioni, spazializzate in ragione di attributi semantici, risponde efficacemente alle esigenze di documentazione e interoperabilità, proprie degli studi interdisciplinari, potenziando la condivisione delle risorse e la creazione collaborativa di conoscenza. L’analisi degli approcci formalizzati finora, mostra diverse questioni aperte e spunti di riflessione connessi con le implicazioni teoriche di una segmentazione architettonica guidata dalla semantica, con le potenzialità espressive e applicative di una interazione più immediata con la rappresentazione digitale nonché con le modalità di accesso e recupero della documentazione spazializzata.

Un primo scopo della ricerca è la definizione di una metodologia di annotazione semantica che risolva l’ambiguità e codifichi l’incertezza della etichettatura, affinando la qualità dell’informazione.

Una seconda finalità è l’indagine di approcci che razionalizzino e ottimizzino il processo di annotazione, migliorando l’interoperabilità e l’interpretabilità da parte di Intelligenze Artificiali.

dottoranda
VALERIA CERA
tutor
prof. arch. MASSIMILIANO CAMPI
cotutors
prof. FRANCESCO CUTUGNO,
prof. arch. JESUS IGNACIO SAN JOSE ALONSO

Il rilievo dell’Architettura tra identificazione tipologica e strutturazione semantica

La Certosa di San Lorenzo a Padula nella rappresentazione digitale per il *Cultural Heritage*

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA
XXXI CICLO

Università degli Studi di Napoli Federico II

Dottorato di Ricerca in Architettura

Settore disciplinare: Tecnologia dell’Architettura e Rilievo e Rappresentazione dell’Architettura e dell’Ambiente
ciclo XXXI

Coordinatore del Dottorato di Ricerca

Michelangelo Russo

Collegio dei docenti

Roberta Amirante	Andrea Maglio
Aldo Aveta	Fabio Mangone
Alfredo Buccaro	Pasquale Miano
Massimiliano Campi	Francesco Domenico Moccia
Renato Capozzi	Lilia Pagano
Maria Cerreta	Maria Federica Palestino
Valeria D’Ambrosio	Renata Picone
Pasquale De Toro	Maria Rita Pinto
Antonella di Luggo	Carmine Piscopo
Leonardo Di Mauro	Sergio Pone
Riccardo Florio	Francesco Rispoli
Carlo Gasparrini	Michelangelo Russo (coordinatore)
Ferruccio Izzo	Valentina Russo
Laura Lieto	Maria Rosaria Santangelo
Mario Losasso	Paola Scala

Tutor

Massimiliano Campi

Cotutors

Francesco Cutugno, Jesús Ignacio San José Alonso

Ringraziamenti

Desidero ringraziare coloro che mi hanno accompagnato in questi anni. Su tutti, il prof. Massimiliano Campi, fonte di ispirazione, che con fiducia e sostegno mi ha offerto importanti occasioni di crescita, professionale e umana. Un ringraziamento va al prof. Francesco Cutugno per avermi sostenuta e incoraggiata in ogni momento. Ringrazio il prof. Jesús Ignacio San José Alonso e tutto il gruppo del Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica LFA della Universidad de Valladolid, con il prof. Juan José Fernández Martín, che mi hanno accolto e fatto sentire a casa. Desidero ringraziare il dott. Antonio Origlia per aver sempre creduto in me e avermi trasmesso entusiasmo per la ricerca. Ringrazio il dott. Livio De Luca per essere stato sempre aperto al confronto. Un ulteriore ringraziamento va al Polo Museale della Campania per la disponibilità e l’opportunità di svolgere il lavoro di tesi nel sito della certosa di Padula. Infine, ringrazio Voi, Te e tanti che nemmeno sanno o immaginano quanto mi hanno aiutato.

Indice

Introduzione	11
--------------	----

PARTE PRIMA	
L'ARRICCHIMENTO SEMANTICO DI MODELLI TRIDIMENSIONALI PER LA CONNESSIONE DEI SAPERI.	
SPERIMENTAZIONI PER LA FORMALIZZAZIONE DI DATABASE RAGIONATI	29

CAPITOLO PRIMO	
La strutturazione di geometrie formali secondo codici semantici. Ricerche e sperimentazioni a confronto	
1.1 L'annotazione di modelli tridimensionali	32
1.2 L'evoluzione delle ricerche nel dominio del Cultural Heritage	36

CAPITOLO SECONDO	
La ricerca in Architettura.	
Formalismi e metodi per l'organizzazione di forma spaziali attorno a modelli di descrizione semantica	
2.1 Teorie e modelli per la semantizzazione di rappresentazioni digitali di manufatti architettonici	47
2.2 Approcci H-BIM e semantica: la parametrizzazione di componenti architettonici come sistema di classificazione delle informazioni	57
2.3 Discussione. Questioni aperte e prospettive di ricerca	64

PARTE SECONDA	
QUESTIONI TEORICHE E METODOLOGICHE IMPLICATE NEL PROCESSO DI ANNOTAZIONE SEMANTICA DI MODELLI ARCHITETTONICI	75

CAPITOLO TERZO

La semantica e l'architettura: temi formalismi e modelli	
3.1 Fondamenti teorici per una lettura semantica dell'architettura	77
3.2 Il vocabolario dell'architetto nell'evoluzione dei tempi	82
3.3 Modelli di conoscenza per l'integrazione delle informazioni: tassonomie, tesauri e ontologie nel web semantico	85
3.3.1 Tassonomia	86
3.3.2 Thesaurus	88
3.3.3 Ontologia e web semantico	92
3.3.4 Osservazioni sui rapporti relazionali tra gli elementi architettonici	99
3.4 Gli standard per la rappresentazione della conoscenza in Architettura	102

CAPITOLO QUARTO

Rilievo reality-based.	
Principi teorici, acquisizione ed elaborazione dei dati	
4.1 Tecniche range-based. Fondamenti teorici e definizione dei sistemi ottici attivi	114
4.1.1 Tipologia e classificazione dei sensori attivi	115
4.1.2 Caratterizzazione dei sensori tridimensionali: risoluzione, precisione e accuratezza	117
4.1.3 Pianificazione e acquisizione dei dati	118
4.1.4 Filtraggio e allineamento dei dati	121
4.1.5 Generazione e correzione del modello poligonale	124
4.1.6 Texturizzazione della maglia poligonale	126
4.2 Tecniche image-based. Fondamenti teorici e definizione della fotogrammetria	127
4.2.1 Equazione di collinearità e bundle adjustment	128
4.2.2 Pianificazione e strategia di acquisizione delle immagini digitali	130
4.2.3 Calibrazione geometrica della camera e orientamento dei fotogrammi	134
4.2.4 Estrazione delle misure 3D, generazione del modello poligonale e texturizzazione	136

CAPITOLO QUINTO

Processi e metodi di strutturazione semantica di modelli architettonici in una visione integrata per la gestione in archivi digitali	
5.1 Algoritmi di semplificazione poligonale	143
5.1.1 Questioni di base	143
5.1.2 Tassonomia dei principali algoritmi	148
5.1.3 Alcune considerazioni finali	157
5.2 Re-topologia e texture baking per il recupero del dettaglio	158
5.3 Processi di strutturazione semantica di dati tridimensionali: algoritmi di segmentazione e	

classificazione		164
5.3.1	Metodi di segmentazione (semi)automatica di nuvole di punti	165
5.3.2	Metodi di segmentazione (semi)automatica di mesh 3D	169
5.3.3	Approcci di classificazione semantica	172
5.3.4	Osservazioni	173

CAPITOLO SESTO

Database per la raccolta e la consultazione delle risorse digitali.	
Caratteristiche e modelli a confronto	
6.1 Database relazionali	179
6.2 Database a grafo	182
6.2.1 Il modello RDF	184

PARTE TERZA	
FORMALIZZAZIONE E SPERIMENTAZIONE DEL PROTOCOLLO DI ANNOTAZIONE SEMANTICA. IL CASO STUDIO DELLA CERTOSA DI PADULA	189

CAPITOLO SETTIMO

La Certosa di San Lorenzo, a Padula nel contesto della tipologia architettonica del monastero certosino	
7.1 Accenni sull'Ordine certosino di San Bruno	191
7.2 La tipologia architettonica della certosa	192
7.2.1 Fondamenti teorici	192
7.2.2 Nuclei architettonici e loro vocazione	196
7.3 La Certosa di San Lorenzo, a Padula	199
7.3.1 Evoluzione storica	199
7.3.2 L'architettura del cenobio	203
7.3.3 Il monastero di San Lorenzo nel contesto delle certose campane e i riferimenti alle certose di Spagna	207

CAPITOLO OTTAVO

Il progetto di documentazione della cittadella monastica di San Lorenzo, Padula.	
Procedure di rilievo integrato e manipolazione del modello digitale	
8.1 Il rilievo tridimensionale della certosa di Padula	219
8.1.1 Il rilievo fotogrammetrico aereo: valutazione dei parametri e acquisizione dei dati	219
8.1.2 Rilievo laser scanning terrestre. Raccolta dei dati	223
8.1.3 Acquisizione fotogrammetrica terrestre	226
8.1.4 La rete topografica	228
8.1.5 Processamento e integrazione dei dati. Valutazione dei risultati	228

8.2	Processi di semplificazione e gestione del modello digitale	237
8.2.1	Riduzione della maglia poligonale	237
8.2.2	Valutazione dell’errore di approssimazione	241
8.2.3	Recupero del dettaglio tramite texture baking	243

CAPITOLO NONO

Concettualizzazione del dominio di conoscenza.

Estrazione del lessico per il dominio delle certose tra diversità linguistica e specializzazione

9.1	L’ambiguità terminologica	261
9.2	Estensione del lessico per le certose	264
9.2.1	Raccolta e strutturazione del corpus bibliografico	264
9.2.2	Estrazione terminologica dalle fonti scritte	265
9.2.3	Estrazione terminologica dalla rappresentazione digitale	268
9.3	Internazionalizzazione del lessico	269

CAPITOLO DECIMO

Un nuovo approccio di caratterizzazione semantica e codificazione dell’incertezza di annotazione.

Teorizzazione e sperimentazione del metodo

10.1	Codificazione del sistema di strutturazione ed etichettatura semantica	274
10.2	Sperimentazione e valutazione del modello	276

CAPITOLO UNDICESIMO

Gestione dei modelli digitali e del corpus informativo in banche dati

11.1	Applicazione delle mappe semantiche	283
11.1.1	Fusione delle mappe	284
11.1.2	Software di visualizzazione e interrogazione: Unreal Engine 4	286
11.1.3	Utilizzo delle mappe semantiche in UE4	288
11.2	Integrazione delle risorse	288
11.2.1	Principio di integrazione	288
11.2.2	Il database di conoscenza: Neo4j	290
11.3	Research e Retrieval delle risorse nel repository	293
11.3.1	Natural Language Processing e architettura di sistema	294
11.3.2	Recupero dei dati tramite gesti di puntamento	295

CAPITOLO DODICESIMO

Conclusioni e prospettive di ricerca future

		301
Appendice		311
Fonti delle immagini		317
Bibliografia		325

Introduzione

I. Scenario

La documentazione del patrimonio culturale costruito è una delle maggiori sfide della comunità scientifica in età contemporanea. Le nuove tecnologie per la digitalizzazione tridimensionale delle forme spaziali costituiscono oggi un efficace supporto di analisi del tessuto storico. Le rappresentazioni digitali fornite, si propongono come copie discretizzate del manufatto reale, dal valore informativo impressionante in termini di precisione geometrica, ricchezza morfologica e qualità del dato metrico e colorimetrico. Oltre ai dati tridimensionali, una grande quantità di informazioni eterogenee sostanzia la documentazione di una architettura e i saperi che testimonia. Si tratta di dati prodotti dalla molteplicità di esperti variamente coinvolti nello studio del patrimonio costruito e provenienti da diversi settori disciplinari (architettura, meccanica, informatica, storia, ecc.). In relazione alle diverse filiere di analisi e conoscenza, gli studiosi forniscono informazioni strutturate in formati differenti e predisposte per scopi di indagine diversificati. Da un lato, gli esperti di conservazione e restauro tendono ad usare tecniche più tradizionali per descrivere la morfologia e lo stato di salute degli edifici usando immagini bidimensionali o persino carta traslucida per creare documentazione cartografica. A questi si accompagnano gli storici, il cui sapere è legato alla produzione letteraria scritta e a rappresentazioni quasi sempre relegate alla dimensione del piano. Dall’altra parte, diversi esperti realizzano acquisizioni spaziali come nuvole di punti, immagini scientifiche quali termografie IR, immagini

satellitari, mappe UV, mappe di profondità, modelli parametrici e non, strutturati per analisi settoriali come la risposta a sollecitazioni meccaniche, il comportamento energetico.

Ad accomunare l'eterogenia delle informazioni, che potremmo distinguere in informazioni quantitative (estratte dal rilievo) e informazioni qualitative (prodotte dall'interpretazione dei dati acquisiti durante l'analisi delle fonti documentarie), è la forma architettonica.

La collezione dei descrittori di un manufatto storico è evidentemente incardinata nella morfologia del costruito, alle cui forme si ricollegano i prodotti variegati delle analisi documentarie. Se, quindi, da un lato, la rappresentazione digitale di una architettura non è esaustiva per la comprensione e documentazione della sua complessità; dall'altro, il modello tridimensionale diviene il tramite per accedere alle diverse eterogenee informazioni che rendono la rappresentazione interpretabile in considerazione dei molteplici fattori che la descrivono.

Un discreto numero di ricerche si è concentrato sulla identificazione di soluzioni, teoriche e metodologiche, per l'interconnessione delle informazioni diversificate. Protocolli e modelli sono stati sviluppati per integrare i dati spaziali delle rappresentazioni digitali con altri di tipo geografico, storico, documentario, strutturando la documentazione attorno a modelli di descrizione semantica. L'arricchimento semantico di dati tridimensionali a scala architettonica veicola la spazializzazione della conoscenza elevando la ricostruzione formale di un manufatto storico a interfaccia per l'analisi, la ricerca e la condivisione delle risorse informative. Lo sviluppo di modelli di strutturazione semantica si pone, difatti, all'intersezione disciplinare tra le scienze storiche, per la documentazione del patrimonio costruito, e le scienze informatiche, per le tecnologie dell'informazione e della comunicazione. Gli avanzamenti continui nella progettazione di piattaforme e soluzioni per la condivisione dei dati, di qualunque natura e formato, supportano la segmentazione e semantizzazione delle masse di informazioni acquisite. La strutturazione semantica consente di declinare la modellazione di grandi insiemi di dati in funzione della specificità delle categorie di oggetti e dei relativi tipi di analisi. Le piattaforme di lavoro contemporanee offrono, sotto il profilo tecnico e tecnologico, una architettura di sistema capace di archiviare, classificare e strutturare le informazioni provenienti da differenti campi disciplinari all'interno di banche dati conformate in accordo ai differenti profili di utenti.

Le potenzialità di siffatti sistemi informativi sono espresse dai numerosi progetti di collezioni e archivi digitali che diverse istituzioni culturali stanno portando avanti, a scala internazionale.

La digitalizzazione delle testimonianze del patrimonio costruito ha animato una nuova sfida: la creazione di sistemi intelligenti, efficienti e scalabili per l'indicizzazione, l'archiviazione, la ricerca e la gestione delle collezioni digitali e della relativa documentazione. La strutturazione delle informazioni, spazializzate in ragione di attributi semantici, risponde efficacemente alle esigenze di documentazione e interoperabilità, proprie degli studi interdisciplinari, potenziando la condivisione delle risorse e la creazione collaborativa di conoscenza.

II. Motivazioni

Molte iniziative e progetti di ricerca contemporanei si concentrano sulla definizione e sullo sviluppo di sistemi di informazioni eterogenee strutturate intorno a modelli di descrizione semantica del corpus documentario e spaziale. L'associazione di etichette semantiche alle rappresentazioni digitali, considerate nella loro interezza o distinte in parti e sotto-parti, implementa e raffina la ricerca e recupero delle informazioni all'interno delle banche dati. Tuttavia, l'annotazione è spesso ambigua e incerta, sia che venga prodotta da un esperto di dominio che da un utente comune. L'ambiguità è imputabile a questioni lessicali ovvero termini che hanno più significati, anche nel medesimo campo di conoscenza. L'incertezza dell'annotazione è, al contrario, strettamente dipendente dall'annotatore e dall'elemento architettonico da etichettare. L'annotatore può essere incerto sul lemma più idoneo per classificare la forma considerata, la cui definizione non si esaurisce nella sua ricostruzione geometrica. Aspetti morfologici, strutturali, materici ancorché di visualizzazione grafica concorrono nel riconoscimento linguistico e semantico di un elemento architettonico.

Il processo di selezione precisa di una superficie, di una porzione, di una sotto-parte e/o della totalità di un componente del manufatto digitale, cui associare l'etichetta semantica, è una operazione spesso onerosa e dispendiosa in termini di tempo e di facilità. Inoltre, l'etichettatura è associata con criteri e linguaggi difficili da interpretare e processare per le Intelligenze Artificiali, limitando in maniera considerevole la capacità delle macchine di trovare connessioni, anche e soprattutto non banali, tra le risorse archiviate nelle banche dati.

In relazione alle riflessioni fin qui condotte, un primo scopo della ricerca è la definizione di una metodologia di annotazione semantica che risolva l'ambiguità e codifichi l'incertezza della etichettatura, affinando la qualità dell'informazione.

Una seconda finalità è la ricerca di approcci che razionalizzino e ottimizzino il processo di annotazione, migliorando l'interoperabilità e l'interpretabilità da parte di Intelligenze Artificiali.

L'uso di ontologie e tesauri, supportato dall'emergere del Web Semantico, risolve l'ambiguità dell'annotazione e consente ai dati arricchiti semanticamente di essere processabili da Intelligenze Artificiali. Quando un termine semantico è tratto da una ontologia di dominio controllato e associato ad una forma tridimensionale come etichetta, un significato più ricco e più esplicito viene attribuito all'annotazione, migliorando la sua interpretabilità. Ad esempio, se un utente crea una etichetta comprendente il termine “mensa” e il lemma “mensa” è tratto da una ontologia che inquadra il concetto nel dominio architettonico e si combina ad un tesoro in cui il vocabolo è definito come sotto-parte dell'altare, l'annotazione sarà esplicita e univoca. Il termine “mensa” è riconosciuto in primo luogo nella sua significazione nel campo di conoscenza dell'Architettura, eludendo l'attribuzione di senso in diritto canonico. Inoltre, il concetto è identificato come una parte dell'oggetto architettonico “altare” piuttosto che una struttura o un locale in cui si preparano e consumano i pasti in determinate collettività.

Il ricorso a ontologie e tesauri per l'annotazione semantica, facilita al contempo il ragionamento sull'elemento annotato e permette alle risorse di diventare parte del più ampio Web Semantico. In particolare, l'annotazione di attributi di basso livello di componenti tridimensionali rende possibile l'inferenza semantica associando etichette di livello superiore. Ad esempio, nel dominio architettonico, è possibile usare regole che associano attributi specifici a un elemento geometrico, come una colonna, in funzione della sua classificazione. Se un elemento verticale è etichettato con un “fusto scanalato” che poggia su una “base attica” e presenta in sommità un “capitello” decorato con “elici” e “caulicoli”, si può dedurre con un alto livello di sicurezza che l'elemento annotato è una “colonna” e specificamente una “colonna di ordine corinzio”.

L'inquadratura all'interno di regole ontologiche e vocabolari di dominio controllato del processo di strutturazione semantica delle informazioni, fornisce una soluzione convincente all'ambiguità di annotazione che, ordinata secondo codici interpretabili e processabili da Intelligenze Artificiali, supporta il ragionamento di inferenza semantica. In aggiunta, la selezione di tesauri formalizzati a livello internazionale, raffina la qualità dell'annotazione, implementa l'interoperabilità delle risorse e definisce un campo comune di ragionamento tra annotatori.

Le implicazioni, teoriche e operative, connesse al processo di annotazione semantica di rappresentazioni digitali architettoniche, rivelano la complessità del sistema. Complessità che risulta evidente nella incertezza di attribuzione di significato manifestata dagli annotatori, sia utenti comuni che esperti di dominio. La difficoltà di un riconoscimento semantico univoco rappresenta una risorsa per la conoscenza del settore di riferimento e come tale richiede sistemi che siano in grado di registrarla e trasformarla in informazione. Una possibilità di perseguimento dello scopo è offerta dall'impiego di mappe semantiche. Si tratta di mappe in scala di grigi che, in virtù della corrispondenza geometrica tra elementi tridimensionali e spazio UV, indicano quali porzioni dell'oggetto complessivo sono rilevanti per un determinato concetto semantico e con quale grado di rilevanza. Il peso è dedotto dal calcolo del grado di accordo tra le annotazioni degli utenti, i quali nel processo di etichettatura sono liberi di applicare attribuzioni di significato incerte. Al sistema di mappatura semantica è demandata la codifica dell'incertezza, riconducendo la valutazione soggettiva ad una scala numerica ordinata.

L'obiettivo principale della ricerca presentata è la spazializzazione della documentazione attraverso la formalizzazione di un metodo di strutturazione semantica di rappresentazioni digitali di manufatti architettonici. Il modello di descrizione semantica teorizzato si basa sull'uso di tesauri internazionali, in formati che supportano il ragionamento semantico e interpretabili da Intelligenze Artificiali, in grado di trasformare l'ambiguità e incertezza di annotazione in informazione e risorsa.

Il campo di investigazione delimitato coinvolge un consistente numero di questioni, teoriche e metodologiche:

- Lessico del dominio architettonico tra ricchezza terminologica, diversità linguistica e pluridisciplinarietà;
- Fattori di incertezza e ambiguità della descrizione semantica di manufatti architettonici;
- Modelli e formati standardizzati per l'annotazione di rappresentazioni digitali in campo architettonico;
- Pesantezza dei modelli digitali per la renderizzazione, manipolazione e gestione in banche dati;

- Diversità di prestazione e risultato degli strumenti e dei protocolli di acquisizione e processamento dei dati spaziali, nell'ambito del rilievo architettonico;
- Servizi e strumenti tecnici a supporto del processo di etichettatura semantica;
- Soluzioni tecnologiche per la raccolta, l'archiviazione, il recupero e la condivisione delle risorse, in funzione della profilazione dell'utente.

La semantizzazione delle masse tridimensionali testimonia l'intersezione disciplinare tra la linguistica, la semiotica, la semantica e l'architettura.

Gli approcci di annotazione semantica di manufatti architettonici si basano sulla attribuzione di significazione a componenti che hanno una propria dimensionale spaziale. La dialettica tra significato e significante è fondata sulla scelta di descrivere le forme geometriche in funzione di vocaboli precisi, afferenti a dizionari di dominio controllato e condiviso. Sotto il profilo lessicale, il dominio dell'architettura si presenta ricco e articolato. Il lessico dell'architetto si è formalizzato nel corso dei secoli con un arricchimento progressivo dei lemmi, codificati a partire dalla produzione letteraria dei trattatisti. Dizionari ed enciclopedie hanno sistematizzato la conoscenza dell'architettura, declinando i concetti e sottendendo alcune delle relazioni principali che li associano. Relazioni e criteri associativi che in un sistema complesso come quello architettonico non sono pochi e banali.

Nella ricchezza lessicale, polisemie e polirematiche concorrono a rendere ambigue le annotazioni. Condizione che si acuisce nella diversità linguistica, con la contrazione o espansione delle disponibilità lessicali, e nella pluridisciplinarietà dell'approccio di etichettatura.

La pluridisciplinarietà, nella dimensione della differente specializzazione di un esperto di dominio, contribuisce alla incertezza dell'annotazione nella misura in cui, sebbene un concetto sia codificato e condiviso, la diversa formazione dell'annotatore condiziona il modo di vedere e interpretare un medesimo episodio architettonico. Un restauratore tenderà a riconoscere e isolare componenti di architettura secondo logiche dissimili da un esperto di geometria. L'incertezza della descrizione semantica è, parimenti, motivata dalla ricchezza del patrimonio costruito ed eterogeneità dei suoi elementi costitutivi. Un esperto di dominio ha difficoltà a classificare univocamente un oggetto che, spesso, nella pratica costruttiva e

nell'evolversi delle tendenze non è riconducibile pedissequamente alle teorizzazioni del linguaggio classico. A contribuire a rendere incerta l'annotazione è anche il supporto su cui la stessa avviene. Le differenti modalità di rappresentazione e di visualizzazione del medesimo elemento forniscono più o meno informazioni, in relazione al tipo di analisi che si vuol condurre. Sistemi che organizzano quindi le informazioni attorno a una singola rappresentazione limitano lo studio che non può esaurirsi in un solo supporto bidimensionale (come pianta, sezione trasversale, ortofoto) né a una singola rappresentazione tridimensionale (nuvola di punti o modello poliedrico).

Il processo di annotazione semantica di rappresentazioni digitali coinvolge una molteplicità di dati il cui sistema di acquisizione, registrazione, raccolta e archiviazione si sostanzia in una pluralità di formati e procedure possibili. Attualmente, vi è una carenza di univocità negli standard (in termini di formato dei dati spaziali e dei metadati connessi, dei modelli di annotazione, dei tesauri) e procedure da adottare per la descrizione semantica di rappresentazioni propriamente architettoniche. La penuria di uniformità nei protocolli operativi di annotazione semantica comporta l'impiego di dati che, non essendo acquisiti e processati secondo formati standard formalizzati, ne limita la successiva condivisione, interoperabilità, integrazione o ragionamento.

La dimensione dei file degli oggetti digitali tridimensionali, sotto forma di modelli poligonali strutturati, rappresenta spesso un problema per l'interazione con gli stessi, sia in ambienti di renderizzazione che all'interno delle banche dati. La manipolazione di rappresentazioni digitali richiede prestazioni performanti da parte dell'unità di elaborazione centrale (CPU), delle schede grafiche, della memoria di accesso casuale (RAM) nonché della lunghezza di banda per l'interconnessione delle risorse online.

La pesantezza dei modelli tridimensionali è strettamente connessa ai sistemi di acquisizione dei dati spaziali. Ad oggi, il panorama di metodologie e strumenti per la registrazione delle informazioni metriche e colorimetriche di complessi architettonici è più che mai vasto. Al di là delle scelte operative puntuali, le soluzioni e tecnologie disponibili consentono la raccolta di una quantità ragguardevole di informazioni le quali richiedono di essere criticamente interpretate e filtrate. La pulitura e filtraggio dei dati è il presupposto per la restituzione di modelli che siano adeguatamente intelligenti - nel senso di informativi in aderenza allo scopo dell'analisi - con un giusto peso dal punto di vista tecnico-informatico.

La grande varietà di metodologie e strumenti, finalizzata all'acquisizione delle informazioni metriche e colorimetriche di sistemi architettonici, si riflette nella diversità delle prestazioni e dei risultati. Ciascuna strumentazione, impiegata secondo un disciplinare operativo specifico e codificato, possiede delle potenzialità che acquisiscono valore e significatività solo se rispondenti allo scopo dell'operazione di rilievo. In generale, a tecniche e strumenti che garantiscono un elevato grado di affidabilità e precisione geometrica si affiancano metodologie che fanno del realismo della tessitura superficiale il loro punto di forza, declinando tutte il grado di accuratezza in funzione della scala di dettaglio. Le diverse esperienze di rilievi digitali tridimensionali hanno mostrato come non esista una metodologia unica che escluda le altre per la sua superiorità. L'integrazione fra soluzioni e tecnologie diverse rappresenta sempre, quando è possibile condurla, l'approccio migliore. La sfida che si pone è la codificazione di una procedura che consenta di coniugare la precisione metrica con la fedeltà visiva nel rispetto di tempi di acquisizione e processamento ridotti, a vantaggio di un livello di accuratezza ed economicità delle strumentazioni elevato.

Un significativo numero di progetti e iniziative ha reso disponibili servizi e soluzioni per l'annotazione semantica di oggetti tridimensionali, afferenti variamente al campo del patrimonio culturale. Nella maggior parte dei casi si tratta di applicazioni desktop o plug-in di piattaforme proprietarie, nate all'interno di progetti di ricerca, di difficile accesso, gestione e comprensione da parte di un pubblico vasto. Parallelamente, alcune investigazioni stanno concentrando la propria attenzione sullo sviluppo di interfacce completamente basate sul Web, eventualmente personalizzabili ed estendibili. Al di là della condizione o meno di dover scaricare o installare software, di cui avere eventuale autorizzazione, l'aspetto centrale è la necessità di dotare gli annotatori di strumenti che rendano il processo di annotazione di masse tridimensionali facile, fluido e quanto più speditivo possibile.

La ricerca delle risorse annotate semanticamente e archiviate nelle banche dati è molto spesso strutturata con schemi non intuitivi per le persone che non hanno familiarità con il dominio di conoscenza specifico. I termini di ricerca utilizzati dagli esperti sono spesso diversi dai termini utilizzati dall'utente comune, la cui profilazione può variare da un appassionato del settore a un estraneo del dominio di riferimento. Ne consegue che i non esperti consultano le risorse archiviate anche senza una conoscenza preliminare dell'oggetto o della terminologia specifica del dominio. La scelta delle soluzioni tecnologiche per la raccolta e la condivisione delle risorse

deve rispondere al requisito aggiuntivo di rendere facile l'indicizzazione e il recupero dei metadati, supportando diversi tipi di ricerca sia da parte di non esperti che di utenti con esperienza.

III. Caso applicativo

La ricerca presentata si inserisce all'interno delle attività del Progetto di Rilevante Interesse Nazionale “*CHROME Cultural Heritage Resources Orienting Multimodal Experiences*”.

Nato dalla collaborazione fra informatici, linguisti e architetti, il PRIN CHROME è un progetto interdisciplinare che ha l'obiettivo di formalizzare una metodologia di collezione, analisi e modellizzazione di dati multimediali e multimodali, relativi alla descrizione di Beni Culturali, utili per progettare agenti virtuali applicabili in ambienti museali. Inserito in scenari virtuali tridimensionali, l'agente è realizzato per affiancarsi alle guide turistiche al fine di aumentare le potenzialità di intervento sul pubblico in visita presso siti e opere di interesse culturale. Le caratteristiche dell'agente sono modellate basandosi sul comportamento posturale, gestuale e prosodico di operatori specializzati nella trasmissione di contenuti culturali. Queste figure, mediatrici tra specialisti e profani, tra esperti di beni culturali e visitatori, posseggono particolari conoscenze specialistiche e utilizzano strategie linguistico-gestuali specifiche per attirare l'attenzione dei visitatori. Il campo di sperimentazione delle attività di CHROME è definito dalle tre certose della Campania: la certosa di San Martino a Napoli, la certosa di San Lorenzo a Padula e la certosa di San Giacomo a Capri.

Per il conseguimento degli obiettivi proposti, il team di ricerca è altamente multidisciplinare e organizzato intorno a cinque unità che costituiscono il consorzio. Il centro di ricerca interdipartimentale URBAN/ECO dell'Università degli Studi di Napoli Federico II è al vertice del consorzio e coordina le attività dei ricercatori presso le unità del Dipartimento di Filosofia dell'Università di Roma Tre (R3), dell'Istituto di Scienze Applicate e Sistemi Intelligenti “Eduardo Caianiello” del Centro Nazionale di Ricerca Italiano (ISASI del CNR), del Dipartimento di Studi Umanistici dell'Università di Salerno (UNISA) e dell'Istituto di Linguistica Computazionale “Antonio Zampolli” del Centro Nazionale di Ricerca Italiano (ILC del CNR). Il team si occupa della ricerca dei diversi aspetti semantico-pragmatici della comunicazione nel dominio specifico dei beni culturali ed è per questo formato da linguisti con specifiche competenze in prosodia, pragmatica, paralinguistica, analisi del comportamento non-verbale, linguisti computazionali, informatici specializzati in Intelligenza

Artificiale e Interazione Uomo-Macchina, architetti con esperienza in rilievo e semantizzazione di modelli architettonici.

Il progetto è organizzato in tre fasi principali.

La prima è la raccolta dei dati, articolata in: registrazione audio e video di *gatekeeper* (operatori specializzati) che presentano contenuti culturali in situazioni di *edutainment*; attività di rilevamento architettonico per il processamento di modelli digitali rappresentativi dei siti di riferimento; raccolta della produzione letteraria relativa alle architetture e opere d'arte esaminate.

Partendo dal corpus di interazione verbale di dominio, i linguisti estraggono e annotano le caratteristiche prosodiche e paralinguistiche che accompagnano l'interazione uomo-uomo. In aggiunta alla comunicazione orale, particolare attenzione è posta agli aspetti non verbali dei segnali sociali.

Dal corpus testuale, i linguisti computazionali e gli informatici estraggono le caratteristiche semantiche e linguistiche della produzione scritta e valutano le modalità per la trasformazione degli enunciati dallo stile del testo scritto a quello della lingua parlata.

I dati metrici e colorimetrici del rilievo architettonico definiscono la documentazione di base su cui gli architetti lavorano per la creazione dei modelli tridimensionali dei luoghi della visita, analizzando le procedure più opportune per la strutturazione semantica delle rappresentazioni architettoniche digitali al fine di poterle navigare in maniera interattiva.

La base di conoscenza, estratta dall'analisi dei dati raccolti, è strutturata al fine di costruire un modello che consenta di comporre una presentazione orale - non predefinita - nel dominio del patrimonio culturale. Il confronto delle espressioni orali con le espressioni trovate nei testi è finalizzato alla selezione automatica di frammenti che possono ordinare la presentazione finale, insieme ai gesti e alla sintesi della prosodia. La presentazione è affidata a un agente virtuale per il quale il modello teorizzato tiene in conto la possibilità di passare da una comunicazione precisa a una vaga e viceversa, al fine di adattarsi al tipo di interlocutore nonché la possibilità di simulare i segnali sociali per potenziare la vicinanza al comportamento umano, attraverso il controllo computazionale dei gesti, della prosodia e in generale degli aspetti della comunicazione multimodale. Il raggiungimento dell'obiettivo è supportato dall'associazione semantica delle componenti della dimensione linguistica alle entità geometriche del modello spaziale. L'annotazione delle rappresentazioni digitali tridimensionali consente di collegare la presentazione alla selezione automatica del materiale ausiliario e di interrogare la documentazione con un sistema di dialogo in linguaggio

naturale, in cui le informazioni risultano spazializzate.

Le riflessioni sui possibili approcci di scomposizione semantica di una rappresentazione architettonica digitale e la spazializzazione della documentazione connessa, hanno sostanziato la domanda di ricerca cui lo studio presentato mira a definire una soluzione, rispondente ai requisiti di progetto.

Come si dirà nei paragrafi a seguire, l'individuazione del tema di investigazione comporta analisi e ragionamenti più ampi, dilatati in più settori disciplinari in cui i temi dell'Architettura, in generale, e del Rilievo e della Rappresentazione della stessa, in particolare, fanno da *fil rouge*.

La selezione, poi, come campo di sperimentazione della ricerca, delle architetture certosine erette in Campania, con un approfondimento particolare per il cenobio di Padula, specifica ulteriormente lo studio che dalla teorizzazione di un modello generale di segmentazione semantica, lo dettaglia in virtù della tipologia architettonica del caso studio.

IV. Definizione della ricerca

La capitalizzazione dei saperi connessi ai modelli spaziali, ha determinato la codificazione di metodi, la definizione di formalismi e lo sviluppo di strumenti informatici finalizzati alla documentazione, condivisione e comunicazione del costruito storico.

Tuttavia, il tema della annotazione semantica spazializzata è un campo di sperimentazione ancora giovane e fertile. L'analisi degli approcci formalizzati finora, mostra, difatti, diverse questioni aperte e spunti di riflessione connessi con le implicazioni teoriche di una segmentazione architettonica guidata dalla semantica, con le potenzialità espressive e applicative di una interazione più immediata con la rappresentazione digitale nonché con le modalità di accesso e recupero della documentazione spazializzata.

Ambendo a beneficiare delle esperienze precedenti più virtuose, lo studio proposto punta a fornire una possibile risposta alle carenze più consistenti.

IV.I Domande di ricerca

Nello scenario di ricerca delineato, il lavoro è maturato dalla focalizzazione dei seguenti interrogativi:

- Qual è la metodologia di acquisizione dei dati spaziali architettonici più idonea a coniugare l'esigenza di accuratezza e precisione geometrica con la richiesta di fedeltà della percezione visiva?
- Come poter rendere i modelli digitali tridimensionali - ottenuti dalla triangolazione delle informazioni spaziali precedentemente acquisite - gestibili da piattaforme e banche dati senza perdita di definizione/informazioni?
- Quali ontologie e tesauri esistenti possono essere utilizzati per descrivere gli oggetti del patrimonio culturale architettonico (per esempio, CIDOC Conceptual Reference Model (CRM))?
- Qual è il miglior modello di rappresentazione per le annotazioni (per esempio, RDF, Web Ontology Language OWL, JavaScript Object Notation for Linked Data (JSONLD))?
- Quali termini e quale lessico è richiesto dagli esperti di dominio per definire gli oggetti del patrimonio culturale architettonico e le relazioni tra le parti di tali oggetti?
- Qual è il metodo migliore per isolare gli elementi architettonici corrispondenti a concetti di dominio e indentificarli in modo univoco?
- Come poter sviluppare una interfaccia comoda e facile che consenta la selezione interattiva delle componenti geometriche e la loro segmentazione in eventuali parti e sotto-parti?
- Qual è il metodo migliore per associare gli elementi architettonici ai relativi concetti semantici?
- Come associare ai componenti architettonici, descritti semanticamente, gli eterogenei materiali documentari?
- Qual è il sistema più idoneo ad archiviare le annotazioni associate al modello tridimensionale in piattaforme informative?
- Qual è il modello di archiviazione, gestione e recupero delle annotazioni migliore per incorporare ontologie e abilitare anche gli utenti non esperti alla ricerca delle risorse?

- Come ottimizzare l'indicizzazione, la ricerca, l'interoperabilità, il confronto, l'analisi comparata delle risorse archiviate, potenziando i sistemi informativi?

IV.II Obiettivi

Lo scopo della ricerca è la definizione, formalizzazione e valutazione di un modello per la strutturazione semantica di rappresentazioni architettoniche digitali che faciliti la raccolta, l'archiviazione, l'inferenza e lo scambio di conoscenza relativa al patrimonio culturale. Il sistema codificato si basa sull'impiego di modelli tridimensionali quale supporto per l'annotazione all'interno di un processo che registra l'ambiguità e l'incertezza di associazione semantica degli esperti di dominio. L'incertezza viene trattata come informazione, da problema diviene dato e quindi risorsa, archiviata in piattaforme informatiche informative secondo formati e linguaggi che siano interrogabili da Intelligenze Artificiali al fine di ottimizzare la condivisione, l'interoperabilità e la creazione collaborativa di conoscenza. Il proposito generale della ricerca si articola in più obiettivi specifici, dettagliati di seguito:

- Definire una procedura di acquisizione dei dati spaziali architettonici capace di coniugare l'accuratezza e la precisione geometrica con la fedeltà della percezione visiva;
- Formulare una filiera operativa capace di trasferire i modelli digitali tridimensionali in piattaforme per la loro manipolazione, renderizzazione e gestione, senza perdita di definizione e di informazioni legate alla geometria, alla forma, alla tessitura, ecc.;
- Valutare l'impiego di ontologie e tesauri di dominio specifico già formalizzati, nel rapporto linguistica/semiotica/semantica/architettura;
- Analizzare le relazioni di corrispondenza terminologica nell'ambito del lessico di dominio architettonico, nell'operazione della traduzione linguistica;
- Sviluppare un metodo di strutturazione semantica che identifichi, isoli e associ elementi geometrici a concetti semantici;

- Abilitare l’annotazione di parti e sotto-parti attraverso interfacce facili e comode per l’interazione;
- Supportare la migrazione di annotazioni tra diverse rappresentazioni tridimensionali dello stesso elemento architettonico (nuvola di punti, superficie poliedrica, *nurbs*, ecc.);
- Codificare un sistema di annotazione semantica che registri l’ambiguità e l’incertezza di annotazione da parte degli esperti di dominio;
- Definire un sistema per associare ai componenti architettonici, annotati semanticamente, i materiali documentari eterogenei;
- Valutare l’usabilità di banche dati capaci di incorporare regole ontologiche per dedurre livelli superiori di etichettatura semantica a partire dalla combinazione di attribuzioni di livello inferiore;
- Valutare l’impiego di piattaforme informatiche che sfruttino Intelligenze Artificiali per l’ottimizzazione della ricerca, dell’interoperabilità e dell’analisi comparata delle risorse archiviate, divenendo sistemi informativi di supporto decisionale.

IV.III Metodologia

Il raggiungimento degli obiettivi, formulati in risposta alle questioni poste in precedenza, è costruito attraverso una metodologia articolata in quattro fasi principali e sperimentata sul caso studio:

- Acquisizione dei dati spaziali geometrici e colorimetrici;
- Concettualizzazione del dominio;
- Strutturazione semantica della rappresentazione digitale;
- Sviluppo del sistema di gestione delle annotazioni.

Di seguito, si specificano le finalità e i processi associati a ciascuno dei passaggi metodologici.

Acquisizione dei dati spaziali geometrici e colorimetrici. La prima fase della metodologia è incentrata sul rilievo architettonico ovvero sulla acquisizione dei dati, geometrici e colorimetrici, che permettono la costruzione di

un modello digitale, rappresentativo dell’architettura oggetto di analisi. L’operazione di raccolta dei dati si scompone, a sua volta, in quattro passaggi operativi: registrazione delle informazioni spaziali e di colore in situ; processamento dei dati raccolti; integrazione del corpus conoscitivo; filtraggio e pulitura dei dati. La finalità della prima fase è la ricostruzione morfologica del caso studio, tradotta in un modello poligonale texturizzato. Uno scopo secondario è l’identificazione di un flusso di lavoro ottimale per combinare le istanze di accuratezza geometrica e fedeltà dell’esperienza visiva e per snellire la generazione di differenti rappresentazioni digitali con complessità poliedrica decrescente (*high-poly*, *low-poly*).

Concettualizzazione del dominio. In questa fase, la ricerca è incentrata sulla selezione dell’ontologia e del vocabolario di dominio per l’associazione di concetti semantici a componenti geometrici. Nel momento metodologico della concettualizzazione del dominio, rientra l’arricchimento del lessico in relazione all’architettura specifica di applicazione del metodo. Uno scopo secondario del processo è la raccolta quanto più esaustiva possibile della produzione letteraria concernente il tipo della certosa e, specificatamente, i complessi campani con una attenzione maggiore per il cenobio di Padula. I lemmi puntuali della tipologia architettonica della certosa, sono estratti sia dal corpus delle relative fonti documentarie che dall’analisi del modello digitale. La mappatura delle descrizioni testuali è lo strumento per la valutazione e validazione dell’estensione terminologica.

Strutturazione semantica della rappresentazione digitale. Il terzo passaggio della metodologia si interessa della organizzazione di tutto l’apparato documentario, raccolto nelle fasi precedenti, per strutturare semanticamente il modello architettonico. Un protocollo di segmentazione della rappresentazione digitale viene codificato per individuare e isolare elementi della architettura in accordo ai concetti, formalizzati nel tesaurus di dominio specifico. La finalità principale di questa fase è la definizione di un modello di annotazione semantica che registri, nel processo di etichettatura, l’incertezza e ambiguità di classificazione degli annotatori. Il sistema punta a tradurre l’incertezza in risorsa di informazione, riconducendo la significazione soggettiva dell’annotatore in una scala numerica ordinata rappresentativa del grado di accordo. Uno scopo secondario è lo sviluppo di un modello di annotazione che supporti la migrazione delle etichette tra diverse rappresentazioni tridimensionali dello stesso oggetto.

Il metodo teorizzato è valutato in base all’usabilità, alla precisione, alla efficienza e alle prestazioni. È testato attraverso sessioni di annotazione, organizzate con esperti di dominio.

Sviluppo del sistema di gestione delle annotazioni. La metodologia si conclude con l’individuazione di una banca dati in cui archiviare i contenuti digitali, la cui architettura informatica renda possibile l’interoperabilità e l’interrogazione da parte di Intelligenze Artificiali.

Il sistema deve supportare il ragionamento semantico, basato su regole ontologiche di inferenza, a partire dalle annotazioni associate alle risorse digitali tridimensionali. Un ulteriore obiettivo è l’abilitazione a ricerche condotte non esclusivamente per parole chiave ma tramite spazializzazione e/o attributi più avanzati.

La soluzione viene valutata per la sua interoperabilità, flessibilità ed efficienza in termini di prestazioni di archiviazione e recupero.

V. Struttura della tesi

La ricerca è articolata in tre parti in cui, definito lo scenario di riferimento, vengono esplicitati i principali temi che coinvolgono la spazializzazione semantica della documentazione architettonica, l’approfondimento di questioni teoriche e metodologiche per la semantizzazione delle forme tridimensionali, la formalizzazione di un metodo di descrizione semantica risolutivo di alcune istanze più contemporanee di etichettatura e l’applicazione al caso studio.

La **prima parte**, di introduzione alle tematiche trattate nella ricerca, delimita il campo in cui lo studio si colloca facendo il punto sui risultati finora raggiunti dalle precedenti esperienze a scala internazionale. È suddivisa in due diversi capitoli.

Il primo capitolo fornisce una revisione critica della letteratura, strutturata come ricognizione storica e analisi di lavori precedenti correlati a procedure di annotazione semantica di risorse digitali tridimensionali, generali e poi incardinate nel dominio del patrimonio culturale.

Il secondo capitolo specifica la revisione della produzione letteraria di riferimento, incentrando l’analisi critica sulle ricerche maturate nel dominio specifico dell’arricchimento semantico di manufatti architettonici. I lavori più rigorosi di annotazione di architetture sono confrontati con gli approcci di scomposizione e modellazione semantica propri della filosofia BIM e HBIM, cui un richiamo è doveroso per completare il quadro di

riferimento.

La disamina delle ricerche e dei lavori precedenti consente di evidenziare le carenze e le potenzialità degli approcci già formalizzati e di individuare le prospettive di ricerca cui concentrare il lavoro di tesi.

La **seconda parte** dello studio è un approfondimento sulle questioni teoriche e metodologiche principali connesse al processo di strutturazione semantica di rappresentazioni digitali di manufatti d’architettura.

Il terzo capitolo esamina le relazioni disciplinari intercorrenti tra la linguistica, la semiotica, la semantica e l’architettura. Un *excursus* sulla sistematizzazione lessicale del dominio architettonico si accompagna all’introduzione delle regole ontologiche che organizzano le relazioni tra i concetti di architettura.

Il quarto capitolo è uno studio approfondito delle principali tecniche per l’acquisizione e il trattamento dei dati spaziali. Vengono in particolare descritti i principi teorici fondamentali e le procedure per l’elaborazione delle informazioni, fino alla generazione di un modello poligonale e sua mappatura fotografica.

Il quinto capitolo si occupa delle operazioni di filtraggio, pulitura e semplificazione ragionata dei dati processati. Le diverse tecniche e algoritmi di semplificazione selettiva del livello di dettaglio di un modello poliedrico sono analizzati e relazionati alle metodiche di *texture baking* per il recupero di alcune caratteristiche della geometria semplificata. Contestualmente, vengono approfonditi i processi già codificati per la manipolazione delle rappresentazioni digitali secondo modelli di descrizione semantica.

Il sesto capitolo introduce le soluzioni tecniche e tecnologiche di archiviazione, gestione e condivisione delle risorse digitali annotate semanticamente. Prestazioni, limiti e potenzialità dei sistemi a supporto della etichettatura semantica sono discussi in questa fase della ricerca.

La **terza parte** presenta la teorizzazione di un nuovo modello di annotazione e la sua sperimentazione su un caso applicativo.

Il capitolo settimo presenta la Certosa di San Lorenzo a Padula quale caso studio, nell’ambito di un Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale, incentrato sulle architetture delle Certose campane. La ricerca specifica si incentra sull’analisi della tipologia architettonica delle Certose. La morfologia e la regola compositiva dei complessi monastici sono strettamente connesse con la Regola dell’Ordine certosino. Una disamina sulle origini storiche e sulle caratteristiche dei cenobi, dislocati in tutto il continente europeo, supporta l’individuazione dei caratteri formali che ne definiscono il codice. Riconosciuta la regola, è possibile focalizzare

l'attenzione sulla anomalia. Il campo di sperimentazione si particolarizza e si dettaglia con i monasteri eretti in Campania e, tra questi, la casa di Padula.

Il capitolo ottavo è il primo dei quattro in cui è declinata la metodologia di annotazione teorizzata. Il capitolo affronta puntualmente le fasi di rilievo architettonico, dalla acquisizione alla elaborazione dei dati, ottenuti con due diverse tecniche: rilievo *laser-scanning* terrestre e rilievo fotogrammetrico, aereo e terrestre. Particolare attenzione è posta alla modalità di integrazione delle informazioni al fine di coniugare l'accuratezza geometrica, propria del TLS e la fedeltà visiva assicurata dai processi fotogrammetrici. L'ultima parte si interessa della semplificazione del modello poligonale, precedentemente processato, perseguita applicando algoritmi di *clustering* e valutando il grado di discostamento geometrico post-semplificazione. Un processo di *texture baking* è esplicitato per il recupero dell'esperienza visiva della rappresentazione digitale.

Il nono capitolo è dedicato alle scelte e alle modalità di concettualizzazione del dominio. Introdotto il tesoro di riferimento terminologico, sono dettagliate le fasi di estensione del lessico connesse all'analisi della tipologia architettonica specifica del caso applicativo. Questioni di competenza nel dominio di conoscenza, diversità linguistica e internazionalizzazione lessicologica sono affrontate.

Il decimo capitolo descrive nel dettaglio la teorizzazione, lo sviluppo, l'implementazione e la valutazione del sistema di annotazione semantica. Le caratteristiche del metodo di strutturazione secondo logiche semantiche rispettano i requisiti formulati nelle fasi di ricerca precedenti: etichettatura a partire da supporti tridimensionali; registrazione dell'incertezza dell'annotazione e trasformazione dell'ambiguità in informazione, traducendo la valutazione soggettiva in risorsa scalabile. Il capitolo presenta anche la sperimentazione e valutazione del modello mediante sessioni applicative di annotazione condotte da un campione di esperti di dominio su una selezione di concetti architettonici collegati ad un ambiente del caso di studio.

L'undicesimo capitolo conclude la spiegazione della metodologia trattando la scelta della tipologia di banca dati in cui archiviare le risorse annotate semanticamente. Lo scopo della selezione è la codifica delle annotazioni secondo linguaggi interpretabili da Intelligenze Artificiali, per l'ottimizzazione dell'interoperabilità della conoscenza e dei saperi.

Il capitolo dodicesimo riassume i contributi della ricerca e cerca di valutare la misura in cui gli obiettivi sono stati raggiunti. Vengono proposte indicazioni di ricerca future per affrontare le restanti sfide e indagare sviluppi ulteriori.

PARTE PRIMA

L'arricchimento semantico di modelli tridimensionali per la connessione dei saperi.

Sperimentazioni per la formalizzazione di database ragionati

CAPITOLO PRIMO

**La strutturazione di geometrie formali
secondo codici semantici.
Ricerche e sperimentazioni a confronto**

La strutturazione semantica di rappresentazioni digitali di manufatti architettonici costituisce oggi un protocollo analitico - operativo, diffuso e comprovato presso la comunità scientifica.

La sua definizione risponde alla necessità di associare ai dati spaziali, in maniera strutturata, la grande quantità di informazioni eterogenee che ne sostanziano la documentazione.

L'avanzamento tecnologico della sensoristica, inclusa negli strumenti di acquisizione del corpus spaziale, ha prodotto un importante problema di sovrabbondanza di informazioni che, in unione alle conoscenze documentarie, si accompagnano ai manufatti reali senza una sistematizzazione formalizzata. La massa crescente di nuvole di punti, modelli tridimensionali e dati, variamente afferenti ai diversi settori disciplinari interconnessi all'architettura, tutti non interpretati, hanno fatto emergere, conseguentemente, una grande necessità di metodologie innovative che assistano il processamento, la catalogazione e l'analisi delle conoscenze da parte dei ricercatori.

La capitalizzazione e sistematizzazione dei saperi connessi ai modelli spaziali, si rende ancora più urgente in questi anni in cui il patrimonio costruito vive la costante minaccia di distruzione, intenzionale o attribuita a fattori naturali. La necessità di osservare, analizzare e far conoscere il patrimonio in modo più razionale, economico e duraturo - in risposta ai molteplici fattori di rischio cui è esposto - ha sostanziato la formulazione di metodi, la definizione di formalismi e lo sviluppo di strumenti informatici finalizzati alla documentazione, condivisione e comunicazione

del costruito storico.

1.1 L'annotazione di modelli tridimensionali

Una analisi della letteratura di settore rivela l'esistenza di una ampia gamma di ricerche dedicate all'investigazione, in più domini e discipline, sui metodi e protocolli per annotare oggetti tridimensionali. Si tratta di studi messi a punto in differenti settori applicativi nei quali era già riconosciuta la validità dei modelli tridimensionali digitali come strumento di indagine e di accesso alla conoscenza.

Le prime sperimentazioni che hanno riconosciuto il ruolo della geometria e della semantica come elementi chiave per l'associazione di informazioni e dati eterogenei ad artefatti digitali, si delineano a partire dagli anni '90, presso il gruppo di ricerca dell'IMA di Genova, impegnato, sotto la guida di Bianca Falcidieno¹, nella modellazione geometrica digitale di oggetti tridimensionali.

L'elemento di partenza delle relative ricerche sugli aspetti semantici connessi all'informazione geometrica, fu la riflessione che i modelli digitali di oggetti reali, definiti da elementi puramente geometrici e arricchiti solo da attributi grafici, risultavano validi unicamente per applicazioni finalizzate alla semplice visualizzazione. Questo tipo di strutturazione del modello non consentiva una loro utilizzazione come strumenti di indagine e di comunicazione di tutte le informazioni eterogenee, ad essi associate. Il primo passo, di conseguenza, fu l'introduzione del concetto di *shape* che, oltre alla forma geometrica e agli aspetti visuali, include caratteristiche di struttura, significato ed evoluzione nel tempo.

L'analisi e la descrizione di una forma tridimensionale accolgono necessariamente aspetti diversificati, che variano in base al contesto degli utenti e alle applicazioni. La conoscenza della geometria, sostanziata da dati geometrici spaziali e topologici che sono invarianti nonostante gli scenari, si associa all'analisi relativa al dominio applicativo in cui le forme sono manipolate. Il dominio, che può essere generico o specifico, definisce le modalità di rappresentazione, di elaborazione e di interpretazione delle forme laddove l'oggetto, che le stesse determinano, assume un significato e/o uno scopo puntuale in relazione al suo campo d'applicazione distintivo. La formalizzazione della semantica associata alla forma digitale consente di delimitare parimenti gli attributi relazionati sia alla struttura (scomposizione parte-tutto) che a caratteristiche visive (colore, textures). Tutti i contenuti digitali di una forma tridimensionale, infine, non sono

fissati atemporalmente: l'ineludibile interazione con il tempo comporta una modificazione ed alterazione della forma e delle sue caratteristiche. L'assunto che ne deriva specifica che la modellazione deve, pertanto, riguardare ed integrare sia gli aspetti geometrici che quelli semantici, ovvero legati alla formalizzazione della conoscenza e del contesto di utilizzo degli oggetti (Falcidieno, et al., 2007).

Da questa impostazione metodologica è derivata, nel 2006, la progettazione e lo sviluppo, presso l'IMATI-CNR di Genova², di uno strumento di annotazione grafica, in forma di prototipo, chiamato *ShapeAnnotator*³. Il programma, reso disponibile in forma gratuita a tutti gli utenti interessati, offre una GUI *Graphical User Interface* interattiva per l'analisi, la segmentazione e l'annotazione semantica di superfici poligonali 3D. Dopo aver caricato una maglia poligonale ed un dominio di conoscenza formalizzato in una ontologia in formato OWL⁴, l'utente può utilizzare diversi algoritmi di frazionamento per identificare caratteristiche di superficie pertinenti. Ognuna di queste caratteristiche può essere annotata come istanza di una classe dell'ontologia di dominio specifico e tutto il complesso delle istanze può essere salvato come un archivio OWL⁵. Il limite è nella possibilità da parte dell'utente di intervenire manualmente nella segmentazione delle maglie poligonali, distinte attraverso specifici algoritmi.

Nella stessa decade, si assiste al proliferare di altri disparati studi che cercano di dare risposta, con soluzioni puntuali diversificate, ai medesimi interrogativi.

All'interno del dominio biochimico, due ricerche particolarmente interessanti sono quelle di Hunter e di Peng. La prima (Hunter, et al., 2007) ha esplorato l'annotazione delle relazioni esistenti tra modelli tridimensionali di strutture cristalline di proteine, resi disponibili in vari formati (.pdb, .cif, .mol, .cml). Il secondo studio (Peng, et al., 2009) si è concentrato, invece, sulla abilitazione di annotazioni allegate ad immagini di cellule e molecole 3D.

Molto più numerose sono le sperimentazioni nel campo, ancora generale, delle scene tridimensionali con oggetti digitali.

Jung et al. hanno presentato, a cavallo degli anni Duemila, un proprio strumento di annotazione online, chiamato *Redliner*, poi implementato in *Space Pen*, che consente agli utenti di annotare scene tridimensionali attraverso schizzi di disegni e salvare in un server le descrizioni con relativo

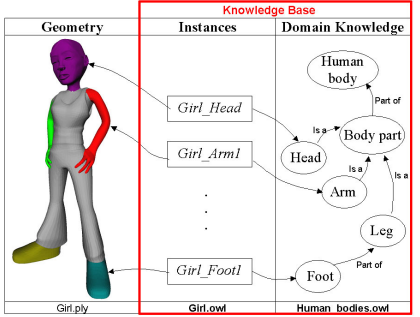


Fig. 1.1.1. Sistema di annotazione in *ShapeAnnotator*. Le parti di geometria sono istanziate secondo concetti formalizzati in una ontologia di dominio.

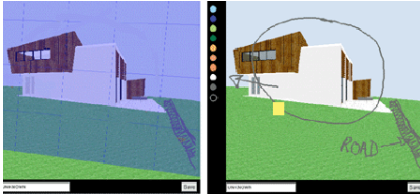


Fig. 1.1.2. Annotazione di scene tridimensionali attraverso disegni. Il quadrato giallo indica una nota di testo per completare le annotazioni.

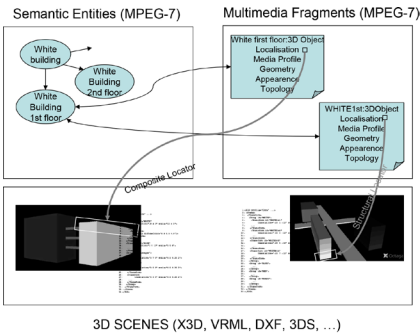


Fig. 1.1.3. Sistema di annotazione di contenuti 3D multimediali.

testo (Jung, et al., 2002).

Nel 2005, Bilasco et al. hanno progettato un modello di annotazione semantica di elementi tridimensionali per facilitare l'annotazione di contenuti 3D multimediali⁶ (testi, video, immagini, suoni). L'approccio, interessante nella direzione di allegare dati provenienti da linguaggi diversificati, non copre alcuni campi informativi fondamentali quali la provenienza della annotazione, l'identità dell'autore, il tipo di contenuto annotato o il metodo di creazione della annotazione (Bilasco, et al., 2005).

Un anno dopo, Kadobayashi et al. hanno proposto un prototipo di annotazione degli oggetti tridimensionali posti all'interno della scena 3D che consente agli utenti di creare, modificare e archiviare in modo autonomo le annotazioni, comunicando con gli altri annotatori operativi nello stesso momento nella medesima scena (Kadobayashi, et al., 2006).

Goldfeder e Allen hanno sviluppato un metodo per superare il problema delle annotazioni incomplete dei mondi tridimensionali attraverso la propagazione di etichette su oggetti con geometria simile. Il loro algoritmo, tuttavia, non supporta l'allegazione di parti tridimensionali che sono specificate in maniera interattiva dall'utente (Goldfeder e Allen, 2008).

In tutti questi progetti, come vediamo, il tema della modellazione e annotazione semantica di geometrie all'interno di ontologie codificate, messo in luce dal gruppo di Genova con lo *Shape Annotator*, risulta ancora eluso da gran parte della comunità scientifica.

Un interessante punto di vista sulla questione relativa all'utilizzo di ontologie formalizzate e alla "personalizzazione" di tassonomie è quella compiuta da Moccozet che ha investigato lo sviluppo di una folksonomia⁷ per una collezione 3D, permettendo agli utenti di assegnare parole chiave agli oggetti tridimensionali. I *tags* esprimono sia rapporti spaziali che gerarchici primari tra le diverse parti che compongono un determinato oggetto e ne definiscono una rappresentazione che può essere espressa tramite un grafico gerarchico da utilizzare per l'elaborazione, l'indicizzazione e la ricerca di contenuti tridimensionali. Tuttavia, questo prototipo non supporta ancora una volta l'associazione di parole chiave a parti degli oggetti 3D definite dall'utente (Moccozet, 2008).

Investigazioni più strutturate in cui si vanno definendo e affrontando, con maggior rigore, i problemi connessi alla definizione di metodologie

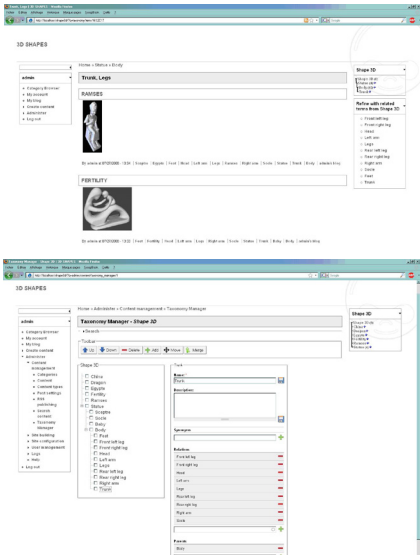


Fig. 1.1.4. Esempio di selezione di forme 3D cui associare etichette personalizzate in folksonomie. In basso, il vocabolario globale ottenuto dai tags personalizzati.

di integrazione di un livello di descrizione puramente geometrico con un livello semantico di rappresentazione di oggetti digitali tridimensionali, sono quelle proposte da Pittarello e Gatto. I due ricercatori riprendono in un certo senso l'impostazione metodologica proposta da Falcidieno et al. con il loro *Shape Annotator* ma consentono un maggior margine di azione agli utenti nella selezione delle parti da annotare. Lo strumento di annotazione per scene tridimensionali, che hanno sviluppato nel 2011, utilizza la semantica per facilitare la condivisione, il riutilizzo e l'interoperabilità. Il loro approccio consente di annotare ciascuna risorsa con un documento di testo libero associandovi una etichetta derivata da una ontologia predefinita da un singolo autore. Il volume spaziale dell'allegazione viene definito modellando l'area semplicemente come una regione di tipo scatolare anziché utilizzare un oggetto 3D in forma libera (Pittarello e Gatto, 2011).

Si tratta di un interessante avanzamento se si considera che nello stesso anno Philipp-Foliguet et al., hanno presentato un software di annotazione, il RETIN-3D, che consente l'indicizzazione e il recupero di oggetti 3D utilizzando una combinazione di annotazione degli utenti e contenuti tridimensionali. Tuttavia, agli utenti non è consentito assegnare né etichette personalizzate né specificate sulla base di ontologie. L'assegnazione è limitata solo all'attribuzione di valore "rilevante" e "irrilevante" (Philipp-Foliguet, et al., 2011).

Nel 2012, Koutsoudis et al. introducono la possibilità di effettuare ricerche tra scene 3D annotate, sulla base di testi allegati in tali scene. La proposta consente di collegare informazioni testuali di vario genere, come aspetti storici, archeologici, architettonici e topologico-spaziali, annettendole stavolta ad un punto di vista tridimensionale. Il limite, pertanto, risiede nella impossibilità di assegnare annotazioni a segmenti e /o parti degli oggetti 3D specificati dagli utenti (Koutsoudis, et al., 2012).

Una dovuta osservazione da fare, a margine di questa revisione di letteratura, riguarda il riconoscimento che questo fervore sperimentale non sfugge neppure ai grandi produttori di programmi commerciali. Un certo numero di aziende sviluppatrici di soluzioni a grande diffusione, difatti, come *Adobe* e *Autodesk*, iniziano a supportare anche l'annotazione di oggetti tridimensionali.

Dalla versione X, *Adobe Acrobat* e *Adobe Reader* forniscono una interfaccia utente che consente l'annotazione di modelli CAD tridimensionali o di oggetti 3D universali, memorizzati in formato .pdf utilizzando strumenti

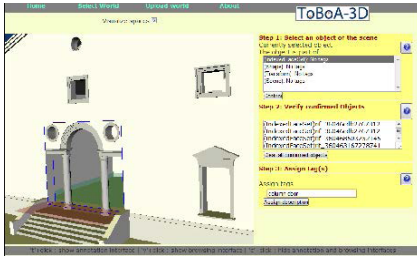


Fig. 1.1.5. Interfaccia dello strumento di annotazione per scene tridimensionali. Associazione di etichette a volumi individuati come regioni di tipo scatolare.

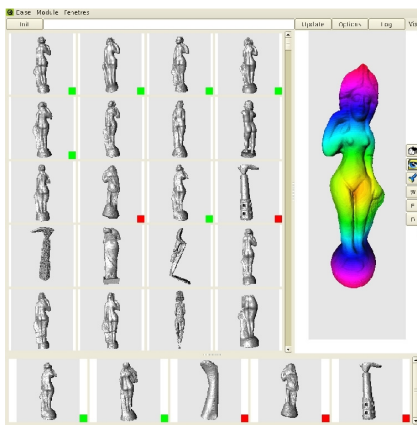


Fig. 1.1.6. Interfaccia di RETIN-3D. I modelli 3D sono indicizzati in base al loro tasso di classificazione: il valore "rilevante" (o "irrilevante"), attribuito dagli utenti, è visualizzato con un segno verde (rosso).

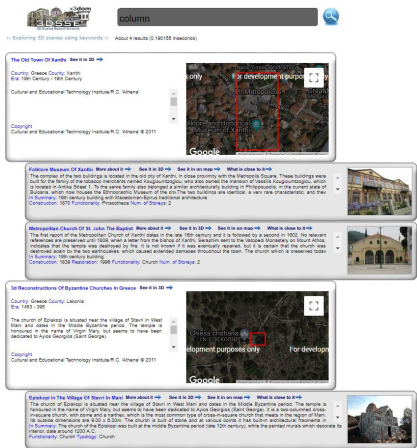


Fig. 1.1.7. Risultati della ricerca tra scene 3D annotate, sulla base della parola chiave "column".

proprietary. Tuttavia, come è noto, questi programmi supportano solo allegati di annotazione di tipo testuale associato a un singolo punto e le annotazioni risultano incorporate al documento PDF impedendone il riutilizzo da parte di altri formati non *Adobe*.

Dalla versione 2012, il programma CAD dell'*Autodesk* ha implementato la possibilità di documentare oggetti tridimensionali creando annotazioni nello spazio modello con specifici livelli che sono visibili unicamente in una vista appropriata.

Queste soluzioni restano, evidentemente, poco sviluppate e soprattutto difficilmente accessibili e migliorabili attraverso l'apporto libero e gratuito delle comunità di sviluppatori, essendo prodotti a pagamento.

1.2 L'evoluzione delle ricerche nel dominio del Cultural Heritage

Il proliferare di indagini sulle annotazioni di artefatti tridimensionali ben presto stimola la diffusione di progetti incentrati sull'associazione di conoscenze e dati eterogenei a modelli digitali del dominio specifico del Patrimonio Culturale.

La moltitudine di iniziative nate negli ultimi dodici anni, rivela divergenze in termini di formati 3D, modelli di dati, architetture di sistema, tecnologie di visualizzazione, funzionalità e approcci operativi adottati per annotare semanticamente le rappresentazioni digitali tridimensionali degli artefatti del patrimonio culturale.

I problemi, sia teorici che applicativi, finora affrontati in contesti molteplici, divengono a partire dal 2004, il centro delle ricerche della rete di eccellenza FP6 AIM@SHAPE *Advanced and Innovative Models And Tools for the development of Semantic-based systems for Handling, Acquiring, and Processing knowledge Embedded in multidimensional digital objects*⁸.

Il progetto, cui hanno partecipato 13 centri di ricerca e università d'Europa⁹, ha proposto per la prima volta l'annotazione semantica di modelli 3D, formalizzata nei diversi contesti applicativi, come elemento chiave per elaborare, trasmettere e archiviare rappresentazioni basate sulla semantica (Falcidieno, et al., 2016). Il passaggio da un livello puramente geometrico a un livello semantico, consapevole delle fasi di processamento e conservazione dei contenuti tridimensionali, è stato condotto attraverso la concettualizzazione, riconosciuta in un quadro comune, che formalizza la conoscenza della forma attraverso l'adozione di metadati e ontologie di dominio condivise. Concetti, significati e relazioni associati alla geometria,

nella sua interezza o distinta in parti e sotto-parti, sono stati formalizzati in ontologie codificate che esplicitano la conoscenza associata alle forme¹⁰. Il *repository* supporta pertanto ricerche sia per parole chiave che per attributi geometrici e semantici, attraverso la formulazione di *query* in linguaggio SPARQL¹¹ (Albertoni, et al., 2005).

Da questa impostazione teorica di riferimento, sono discesi a cascata numerosi progetti che hanno tentato di affrontare e risolvere, di volta in volta, alcuni aspetti stringenti del dominio specifico considerato.

Il progetto Arrigo, ad esempio, rielaborato da Havemann et al. nel 2009, si configura come una mostra museale 3D interattiva che consente ai visitatori di esplorare i modelli tridimensionali di statue scoprendo informazioni dettagliate tramite annotazioni allegate a posizioni specifiche nella scena dei modelli tridimensionali. Le annotazioni sono associate secondo il modello ontologico CIDOC-CRM¹². Il confine del progetto risiede nella visualizzazione della sola regione di interesse mediante l'impiego di primitive semplici come una sfera, anziché forme libere specificate interattivamente (Havemann, et al., 2009).

Nello stesso anno, Echavarria et al. hanno sviluppato uno strumento di annotazione semantica open-source, Tagg3D, per allegare metadati a contenuti tridimensionali, in grado di supportare annotazioni associate a regioni definite dall'utente. La semantica di annotazione, benché conforme al modello dell'ontologia CIDOC-CRM, tuttavia, non è archiviata come risorsa associata indipendente rendendo non ottimale l'elaborazione di annotazioni, la loro condivisione, integrazione e riutilizzo (Echavarria, et al., 2009).

Nel 2011, Abbot et al. hanno studiato il collegamento di annotazioni semantiche ad una scena tridimensionale rappresentante una mostra di manufatti del patrimonio culturale, inserita in un modello architettonico 3D. Il software sviluppato, Empire-3D, supporta solo le annotazioni associate a punti del modello architettonico tridimensionale (Abbot, et al., 2011).

Nell'ambito del progetto 3D-COFORM¹³, sono state studiate annotazioni semantiche degli oggetti tridimensionali appartenenti a collezioni di musei cui è possibile collegare risorse Web generali come ad esempio le immagini del luogo di provenienza dell'oggetto. L'applicazione, discussa da Doerr et al., è basata sul modello di dati CIDOC-CRM e propone di



Fig. 1.1.8. Esempi di ricerca di reperti archeologici ottenuti combinando informazioni geometrico-topologiche e colorimetriche: scelto un modello i risultati ottenuti sono ordinati rispetto alla valutazione di similarità ottenuta.

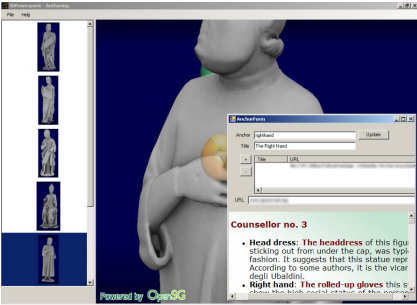


Fig. 1.1.9. Sistema di annotazione allegata a porzioni specifiche di scene tridimensionali. La regione tridimensionale a cui associare le informazioni è individuata con una primitiva semplice quale una sfera.

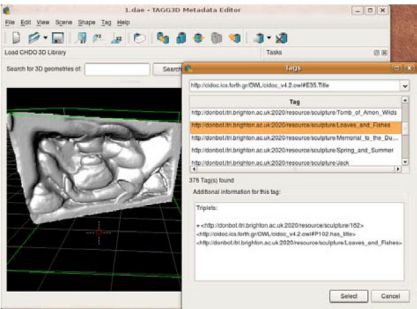


Fig. 1.2.0. Strumento *Tagg3D* sviluppato per annotare contenuti 3D con metadati.

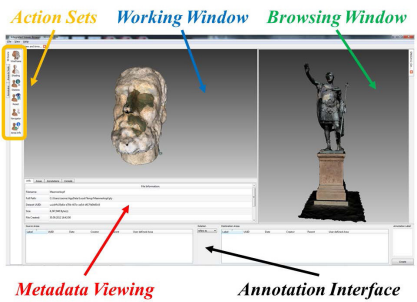


Fig. 1.2.1. Interfaccia grafica utente generale dello strumento di arricchimento semantico interattivo, sviluppato all'interno del progetto 3D-COFORM, diviso in 5 sezioni diverse.

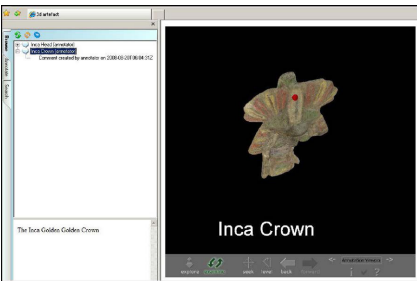


Fig. 1.2.2. Collegamento di una annotazione a un punto/regione tridimensionale.

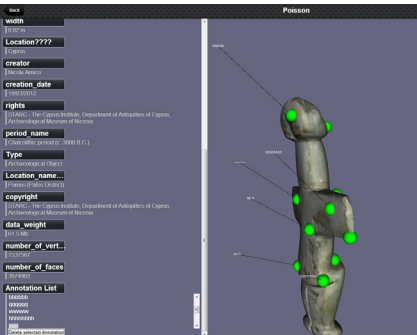


Fig. 1.2.3. Annotazione di oggetti tridimensionali tramite app. L'annotazione è associata su punti di interesse, senza segmentazione dell'oggetto 3D.

integrare ricerche basate su testo con interrogazioni relative alle forme 3D, fornendo un'interfaccia integrata che visualizza sia le specifiche di ricerca che la presentazione visiva dei risultati. Il collegamento delle risorse agli oggetti tridimensionali e la loro visualizzazione, messa a punto da Serna et al., richiede l'impiego di visualizzatori che, purtroppo, non possono essere eseguiti su Web Browser (Doerr, et al., 2010; Serna, et al., 2012).

Hunter et al., di contro, avevano già progettato nel 2009 uno strumento di annotazione per gli oggetti 3D del patrimonio culturale basato sul Web in cui è possibile associare testi liberi o termini tratti da ontologie codificate. Nello specifico, un sotto insieme dell'*Art and Architecture Thesaurus*¹⁴ del *Getty Institute*. Purtroppo, questa applicazione consente solo l'aggiunta di parole chiave e commenti allegati a punti 3D e/o viste dell'oggetto nella sua interezza e non a singole parti tridimensionali (Hunter, et al., 2009).

Lo spunto di utilizzare applicazioni 3D basate sul Web è stato sviluppato anche da Guarnieri et al. che hanno predisposto uno strumento in grado di collegare un'area segmentata di un artefatto tridimensionale del patrimonio culturale a dati correlati, utilizzando software open source. I metadati sono collegati all'oggetto tridimensionale tramite un link HTML che rimanda a una pagina Web ove è possibile visualizzare tutte le informazioni associate. Tuttavia, il loro visualizzatore utilizza comunque un software proprietario e gli oggetti risultano pre-segmentati utilizzando altre applicazioni sviluppate da terze parti (Guarnieri, et al., 2010).

Lavori più recenti, come il progetto *Virtual Museum Transnational Network* V-MusT¹⁵, cercano di far avanzare ancor più il confine dell'accessibilità Web consentendo l'annotazione di oggetti tramite *app* per dispositivi mobile (*Apple iPhones* e *iPads*). L'utente può cliccare su un punto di interesse per annotare un elemento tridimensionale con un testo libero. La limitazione è nella interazione, non prevista, dell'utente con l'oggetto di cui non può definire parti e sotto-parti (El-Zayat, 2013).

Altri progetti nel settore del patrimonio culturale utilizzano tecnologie *Adobe 3D PDF*. Tra questi, i più significativi e vicini temporalmente sono *CARARE*¹⁶ (Masci, et al., 2012) che collega l'archeologia all'architettura nell'ambito del progetto *Europeana* e *3D-ICONS*¹⁷ (D'Andrea, et al., 2012), votato ad incorporare oggetti 3D in documenti PDF, consentendo loro di essere facilmente condivisi in Internet e visualizzati in un browser. Sebbene questo approccio fornisca l'accesso predefinito a tutti gli strumenti di annotazione e misurazione forniti dal software *Adobe*, esso

eredita anche tutte le carenze associate al PDF 3D, comprese le limitate capacità di annotazione e il loro riuso.

Il citato progetto *Europeana*¹⁸, nato nel 2008, riunisce i prodotti diversificati del patrimonio culturale internazionale (libri, film, dipinti, giornali, archivi sonori, mappe, manoscritti e archivi). Si tratta di una biblioteca digitale a carattere europeo che consente anche la ricerca di oggetti tridimensionali archiviati in collezioni presenti in Internet. Con il progetto *Advanced Service Search and Enhancing Technological Solutions ASSETS*¹⁹, il sistema di recupero delle informazioni è stato implementato permettendo di trovare oggetti tridimensionali simili a una *query* di ricerca, basandosi sull'estrazione di attributi di basso livello a partire da criteri visivi. Grazie allo sviluppo di *ASSETS*, al culmine delle sperimentazioni nel 2015, *Europeana* ha integrato inoltre ricerche semantiche per le collezioni tridimensionali, supportando *queries* relative ai campi “*who, what, when, where*” con cui i metadati sono stati archiviati.

In questo proliferare di progetti e sperimentazioni, senza dubbio le ricerche più significative sono quelle che animano il campo dell'archeologia.

Il protocollo di annotazione semantica definito dall'IMATI con lo *ShapeAnnotator* ha portato a risultati molto interessanti confluiti nel progetto, attualmente in conclusione, *GRAVITATE Geometric reconstruction and novel semantic reunification of cultural heritage objects*²⁰. Gli obiettivi generali del progetto *GRAVITATE* sono la creazione di una serie di strumenti software che consentano agli archeologi, ai curatori, ai conservatori e agli illustratori di identificare e ri-unificare gli artefatti del patrimonio archeologico che sono stati separati attraverso le collezioni, ri-associare oggetti della cultura materiale che hanno alcuni relazione (per esempio, la stessa scuola, la medesima età, tipo di modello ...) e infine ri-assemblare frammenti appartenenti allo stesso artefatto frammentato. Gli obiettivi sono raggiunti attraverso l'integrazione di analisi e *matching* geometrico e semantico. Il punto di partenza del progetto è la considerazione che l'elemento che caratterizza i manufatti provenienti da scavi archeologici è la loro frammentazione, la quale rende necessaria l'identificazione ed interpretazione dei frammenti, spesso corrosi e danneggiati. In questo contesto, l'analisi geometrica e semantica dei reperti può avvalersi di criteri di similarità di forma per la loro classificazione e/o ricostruzione virtuale in caso di danneggiamenti consistenti. La similarità di forma, declinata nelle diverse sfaccettature che il termine suggerisce ovvero similarità geometrica, strutturale, funzionale o semantica in senso

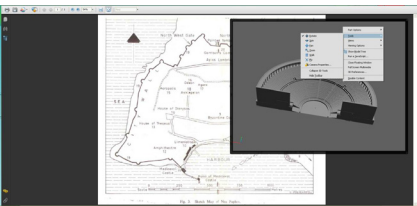


Fig. 1.2.4. Esempio di modello tridimensionale incorporato in un PDF 3D nel progetto *CARARE*.

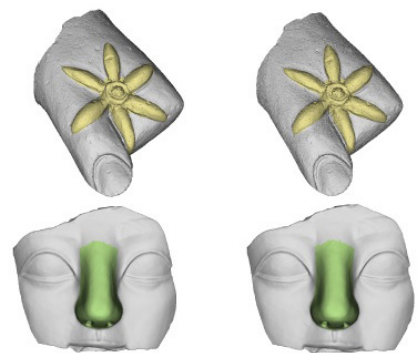


Fig. 1.2.5. Il Risultato del trasferimento dell'annotazione da una mesh a risoluzione inferiore a una a risoluzione maggiore può essere visto nella prima riga (vertici da 50k a 1M), mentre il trasferimento opposto può essere trovato nella seconda riga (da 100k a 50k vertici).

ampio, permette la classificazione di un oggetto nonché la comparazione con altri reperti già indicizzati in *database* condivisi. L'arricchimento semantico dei metadata è strutturato sul modello ontologico fornito da CIDOC CRM e codificato come annotazioni RDF. Le informazioni allegate come annotazioni possono essere trasferite tra modelli poligonali con complessità geometrica decrescente in modo tale che gli utenti possano visualizzare sia modelli tridimensionali ad alta risoluzione che quelli semplificati (Scalas, et al., 2017). A questo scopo, la piattaforma per l'interrogazione della documentazione è stata divisa in *web-client* e *desktop-client*, collegate tra loro, in modo da abilitare ricerche e analisi diversificate (nella versione *desktop-client* sono supportate funzionalità maggiori, compresa la visualizzazione di rappresentazioni digitali *high-poly*). Inoltre, la piattaforma consente di eseguire sia *queries* semantiche, stabilendo relazioni significative tra un insieme di termini di ricerca: cosa, attore, luogo, tempo, evento e concetto che una ricerca di similarità basata su proprietà geometriche e colorimetriche.

L'ambizione di uniformare, integrare e condividere la grande quantità di informazioni che struttura il patrimonio archeologico, classificato e archiviato in banche dati distribuite su scala internazionale, ha animato anche gli sforzi del progetto ARIADNE²¹. La ricerca *Advanced Research Infrastructure for Archaeological Dataset Networking in Europe* si è prefissa il compito di realizzare sia un portale²², in cui riunire i diversi archivi di dati transnazionali, dei quali poi è fornito un link di accesso, sia una piattaforma con servizi di caricamento e condivisione di informazioni²³, registrate su supporti multipli (immagini - *Reflection Transformation RTI*, *High Resolution*, *High Dynamic Range HDR* -, oggetti tridimensionali, modelli territoriali digitali) (Ponchio, et al., 2016). Interoperabilità e dati aperti e gratuiti sono i presupposti delle ricerche di ARIADNE la cui sfida principale è stata lo sviluppo di uno schema globale ed estensibile sotto forma di una ontologia formale capace di veicolare e migliorare l'integrazione tra i dati, senza perdita di significato. Il collegamento dei *database* è fondato sul modello ontologico CIDOC CRM, integrato dal tesoro AAT. Il *mapping* dei materiali raccolti e archiviati nelle banche dati è strutturato sulla base dei vocaboli forniti dall'AAT che essendo multilingue, permette la connessione semantica tra le risorse depositate, indipendentemente dalla lingua in cui è formulata la *query* (Binding, et al., 2016). Il sistema sviluppato supporta sia *queries* strutturate semanticamente che domande libere. L'annotazione semantica dei materiali archiviati segue il modello RDF, tuttavia, essa è associata alla risorsa, ad esempio un modello 3D, considerandola nella sua interezza, senza possibilità di abilitare l'annotazione di parti e sotto-parti

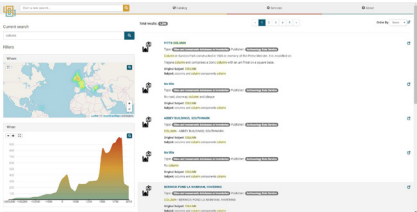


Fig. 1.2.6. Esempio di *mapping* dei materiali archiviati in banche dati internazionali, recuperabili tramite il portale di ARIADNE.

né la visualizzazione di rappresentazioni diverse del medesimo oggetto.

Le esigenze maturate nell'ambito della annotazione spazializzata di modelli tridimensionali del patrimonio culturale, specificamente archeologico, non restano inascoltate neppure da comunità scientifiche geograficamente lontane come quella australiana. Nel 2014, si conclude lo stimolante lavoro di ricerca dottorale di Chih-Hao Yu presso la *School of Information Technology and Electrical Engineering* dell'Università del Queensland (Chih-Hao Yu, 2014). Il punto di partenza del lavoro è un gruppo di vasi greci conservati presso il museo UQ RD Milns. Lo scopo della ricerca è la formalizzazione di un metodo per annotare la collezione di oggetti tridimensionali raccolti che consenta la migrazione delle etichette tra rappresentazioni multiple dei modelli nonché l'attribuzione di annotazione da parte di utenti non competenti, nell'ottica di *crowdsourcing*. Il sistema codificato si basa sull'ontologia CIDOC CRM, integrata da una concettualizzazione del dominio modellata appositamente per il campo della ceramica greca. L'annotazione è studiata per essere associata al modello, considerato nella sua completezza o scomposto in sotto elementi, attraverso esclusivamente un servizio web. I limiti del progetto risiedono nella strutturazione di un metodo che utilizza l'ontologia, predisposta secondo i codici RDF, quasi esclusivamente per validare le annotazioni associate da non esperti, azione estremamente rischiosa e non cosciente delle ambiguità e incertezze di annotazione che animano il lavoro degli esperti di dominio.

In Italia, un interessante e recente contributo al tema dell'arricchimento semantico di manufatti culturali è apportato dal Laboratorio *Visual Computing* dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo" - ISTI - del CNR²⁴. Nell'ambito del progetto di restauro della Fontana del Nettuno a Bologna²⁵, il laboratorio ha curato la realizzazione di un sistema informativo utilizzato dai restauratori durante tutta la durata del cantiere. Il sistema informativo, completamente online ed accessibile direttamente dal cantiere tramite wireless, è utilizzato per raccogliere tutti i dati raccolti, sia durante la fase di analisi dello stato di fatto che della messa in atto del restauro, geo-referenziandoli sui modelli tridimensionali della fontana. L'idea del progetto è di realizzare un sistema fortemente basato sui modelli digitali 3D, che permetta ai restauratori di organizzare in maniera spaziale tutti i dati di restauro, referenziandoli sulla geometria della fontana. A tale scopo, il sistema è strutturato come un *database* in cui le risorse archiviate possono essere ricercate sia con un accesso classico basato su parole chiave, *tags* e relazioni, sia attraverso un "indice spaziale 3D", che è la fontana stessa (Apollonio, et al., 2018). Le annotazioni possono essere collegate al modello

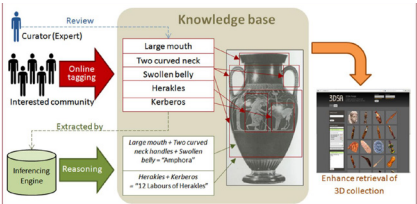


Fig. 1.2.7. Esempificazione dell'utilizzo del *crowdsourcing*, annotazione semantica e inferenza per migliorare l'accessibilità della collezione museale 3D.

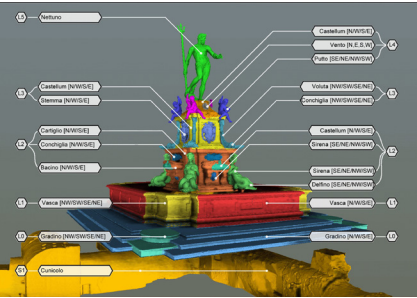


Fig. 1.2.8. Segmentazione gerarchica in livelli del modello tridimensionale della Fontana di Nettuno e successiva suddivisione in sotto-componenti su ciascun livello.

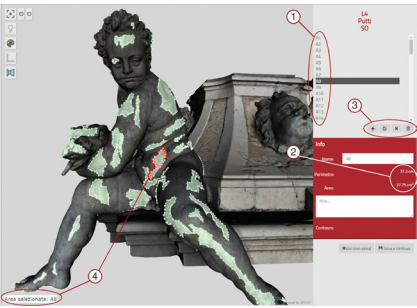


Fig. 1.2.9. Interfaccia per inserire annotazioni 3D: una nuova area, A8 (mostrata in rosso sulla superficie del modello (4)), viene creata nel rilievo presentato. La figura mostra l'elenco di tutte le aree inserite (1), i pulsanti di interazione (3) e le informazioni descrittive sull'area (2).

digitale o a sue sotto-parti marcando le aree interessate mediante l'impiego di vari elementi come punti, linee o regioni²⁶. Il contenuto dell'annotazione può, tuttavia, essere solo un semplice testo libero oppure un link ad altre risorse esterne. Sebbene consenta l'aggiunta di informazioni aperte a più utenti che lavorano contemporaneamente sullo stesso modello, la banca dati non è sufficientemente robusta per gestire grandi quantitativi di dati. Inoltre, il processo di annotazione semantica è condotto nella soggettività dell'utente, senza un riferimento ad una ontologia di dominio. Infine, lo stesso modello tridimensionale della fontana è segmentato in parti e sotto-parti senza seguire una logica di scomposizione ontologica bensì in aderenza alle ragioni di analisi proprie dei restauratori. La segmentazione è poi condotta a monte del processo di annotazione senza possibilità per gli utenti di condurre nuove suddivisioni. Queste criticità generali del progetto sono, evidentemente, radicate nella motivazione per la quale lo stesso è stato sviluppato. In relazione alle finalità della ricerca specifica, il sistema informativo risponde alle istanze di restauro del manufatto per le quali non erano richieste le altre funzionalità evidenziate.

Tutte le ricerche esaminate, offrono soluzioni parziali a problemi singoli e puntali:

- accessibilità tramite Web senza l'obbligo di scaricare o acquistare software proprietari;
- annotazioni di oggetti considerati nella loro completezza o scomposti in sotto-parti;
- possibilità da parte degli utenti di segmentare arbitrariamente i modelli;
- associazione di termini formalizzati o rilevanti per un annotatore specifico;
- visualizzazione della annotazione a seconda del punto di vista o a una rappresentazione definita;
- migrazione della annotazione a supporti di rappresentazioni diversificati);
- banche di dati per la raccolta e recupero delle annotazioni che supportano triplette RDF o sistemi relazionali.

Le funzionalità sono supportate, però, in sistemi che non consentono di trovare la risoluzione in una unica proposta operativa. Pertanto, i vantaggi forniti da un progetto non si integrano con quelli predisposti da un'altra ricerca.

Note

1 L'Istituto CNR di Matematica Applicata di Genova inizia la propria attività di ricerca in grafica e modellazione nella metà degli anni Settanta per lo sviluppo di un progetto CNR finalizzato all'insegnamento a distanza dell'Analisi Matematica nei corsi universitari. Dall'utilizzo di periferiche grafiche interattive per la rappresentazione e l'interrogazione di grafici di funzioni o curve bidimensionali, nacquero linee di ricerca orientate sempre più verso la modellazione geometrica e la topologia computazionale applicata alla sintesi e analisi di superfici e oggetti tridimensionali. Le prime applicazioni, negli anni Ottanta, furono rivolte alla rappresentazione del territorio e dell'ambiente con lo sviluppo di modelli digitali di terreno basati su mesh triangolari per sistemi informativi geografici (GIS) e alla progettazione e analisi di prodotti industriali in sistemi di Computer Aided Design and Manufacturing (CAD, CAM).

2 L'Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche "E. Magenes" IMATI nasce nel 2002 dall'accorpamento e fusione di 3 istituti del CNR: IAN di Pavia, IMA di Genova e IAMM di Milano.

3 <http://shapeannotator.sourceforge.net/index.html>

4 Il linguaggio OWL Web Ontology Language è uno standard progettato per definire ed istanziare ontologie per il Web semantico. OWL è basato sulla Description Logics, un sottoinsieme della Logica del primo ordine (First-order Logic), in base alla quale si possono esprimere le proposizioni sugli oggetti, sulle relazioni tra gli oggetti e sulle proprietà che gli oggetti presentano.

5 Il programma è scritto in C++ e utilizza l'API JMeshLib (<http://jmeshlib.sourceforge.net>) per rappresentare internamente i poligoni della superficie. I formati dei file di input accettati sono quelli gestiti da JMeshLib, vale a dire: OFF, PLY, STL, VER-TRI (formato proprietario utilizzato in IMATI-GE / CNR) e in parte: VRML 1.0, VRML 97, OBJ, IV 2.1. Se la superficie di ingresso non è molteplice e/o non orientata, il software richiama automaticamente le procedure appropriate per tagliare e orientare la mesh, per triangolare le facce non triangolari e per unire coppie di bordi coincidenti.

6 I contenuti 3D allegati sono serializzati nel formato MPEG-7, standard nato per codificare i contenuti multimediali non limitato al semplice audio o video. Permette di definire come sono organizzati i dati multimediali e sincronizzarli con particolari eventi (filmato sincronizzato con i suoi sottotitoli o video con il testo di una canzone).

7 La folksonomia è un neologismo derivato dal termine inglese folksonomy (folk + taxonomy) nato per indicare l'operazione di categorizzare informazioni compiuta da utenti mediante l'utilizzo di parole chiave scelte liberamente dando luogo ad una tassonomia creata da chi la usa in base a criteri individuali.

8 AIM@SHAPE è un progetto di rete di eccellenza finanziato nell'ambito del sesto Programma Quadro dell'Unione Europea - Priorità Tematica 2 Information Society Technologies, con obiettivo strategico "Knowledge Management and Content Creation". http://cordis.europa.eu/ist/kct/aimatshape_synopsis.htm

9 Le attività, iniziate nel gennaio del 2004 e terminate il 31 dicembre 2007, sono state promosse da un Consorzio di 13 istituzioni, provenienti da 8 Paesi europei:

- C.N.R. - Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche, Italia (Coordinamento)
- Università di Genova - Dipartimento di Informatica e Scienze dell'Informazione, Italia
- Ecole Polytechnique Federale de Lausanne - Vrlab, Svizzera
- Fraunhofer Institut, Germania
- Institut National Polytechnique de Grenoble, Francia
- Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, Francia
- Informatics and Telematics Institute, Grecia
- MIRALab at the University of Geneva, Svizzera
- Max-Planck-Institut für Informatik, Germania
- SINTEF - Norwegian Foundation for Industrial and Technical Research, Norvegia
- TECHNION - Israel Institute of Technology, Israele
- Utrecht University, Olanda
- The Weizmann Institute of Science, Israele.

10 Il raggiungimento dell'obiettivo è stato reso possibile dalla crescita, registrata in quegli anni, di un nuovo campo di ricerca multidisciplinare che ha integrato profondamente la Computer Graphics e la Computer Vision con le tecnologie della conoscenza e che ha utilizzato le tecniche di formalizzazione delle conoscenze (metadati e ontologie) per collegare la semantica a forme o a parti della forma per elaborare e ragionare sui dati della forma stessa. Il progetto AIM@SHAPE si è concentrato principalmente sui domini dei Virtual Humans, Product Design e Shape Acquisition and Processing, con alcune contenute diramazioni in altre aree applicative che riguardano forme digitali, come architettura e sistemi informativi geografici. Per ciascuno dei domini specifici sopra citati, sono stati definiti vocaboli e ontologie condivise capaci di descrivere le conoscenze esistenti e le ricerche in corso in quel particolare campo di indagine. Una ontologia di alto livello è stata formalizzata come base comune da condividere, riutilizzare ed estendere alle ontologie specifiche di dominio. Contestualmente è stata predisposta una architettura, su vasta scala, basata sul web e comune, per l'archiviazione delle forme certificate e annotate, la Digital Shape Workbench. Si tratta di una infrastruttura integrata per la ricerca delle forme, resa disponibile sia per il mondo accademico che per l'industria ed aperta a tutta la comunità scientifica.

11 SPARQL - acronimo sintetico di SPARQL Protocol and RDF Query Language - è un linguaggio di interrogazione per dati rappresentati tramite modello RDF Resource Description Framework. Di esso si dirà nel dettaglio nei capitoli 3 e 6.

12 CIDOC CRM - acronimo di Conceptual Reference Model - è una ontologia formale di base, codificata dall' ICOM International Council of Museum allo scopo di facilitare l'integrazione e lo scambio della documentazione per la ricerca scientifica sui beni culturali. Di essa si dirà nel dettaglio al capitolo 3.

13 <http://www.3dcoform.eu/x3dom/index.html>

14 L'Art and Architecture Thesaurus - AAT - è un vocabolario controllato del dominio culturale della Storia dell'Arte e l'Architettura. Di esso si dirà nel dettaglio al capitolo 3.

15 <http://www.v-must.net>

16 <http://www.carare.eu/>

17 <http://3dicons-project.eu/>

18 <https://www.europeana.eu/portal/it/;https://pro.europeana.eu/>

19 <https://pro.europeana.eu/project/assets#project-documentation>

20 <http://gravitate-project.eu/>

21 <http://www.ariadne-infrastructure.eu/>

22 <http://portal.ariadne-infrastructure.eu/>

23 <http://portal.ariadne-infrastructure.eu/services>

24 <http://vcg.isti.cnr.it/index.php>

25 <http://nettuno.comune.bologna.it/>

26 Il sistema informativo è completamente online. La complessa gestione dei dati 3D è ottenuta attraverso l'uso di 3DHOP, uno strumento open-source per la visualizzazione di modelli 3D via web, sviluppato da ISTI-CNR. È stato realizzato un sistema che, in streaming, permette di accedere ai dati tridimensionali del sistema informativo in maniera efficiente, direttamente nel browser, senza componenti aggiuntive. Gli utenti possono esplorare la geometria della Fontana o di un sotto-elemento, controllando il punto di vista con un semplice sistema di navigazione 3D.

CAPITOLO SECONDO

La ricerca in Architettura.
Formalismi e metodi per l'organizzazione di forme spaziali attorno a
modelli di descrizione semantica

Se i protocolli fin qui esaminati trovano impiego nella catalogazione, indicizzazione, ricerca e confronto di elementi del Cultural Heritage in banche dati compartecipate, operazioni condotte secondo criteri e modalità differenti (similarità di forma, omologie geometriche, riferimenti testuali, ecc.), associate, secondo diversi gradi di rigorosità, ad ontologie di dominio specifico, diverse sono le questioni che risultano non affrontate. In particolare, l'impostazione metodologica che accomuna le investigazioni fin qui esaminate, non tiene in considerazione rilevanti aspetti che risultano, al contrario, fondativi se ci si prefigge lo scopo di trasferire la pratica della annotazione semantica al campo disciplinare dell'architettura.

Sono elusi, difatti, aspetti che, per l'indagine e la condivisione delle informazioni connesse a modelli specifici di architettura, devono essere aprioristicamente codificati (ontologie e dizionari di settore specifico, segmentazione dei modelli differenziata in funzione del punto di vista ovvero della finalità dell'analisi, tipologie di rappresentazione diversificate, trasferimento semiautomatico di annotazioni tra diverse versioni digitali del medesimo manufatto, ecc.).

2.1 Teorie e modelli per la semantizzazione di
rappresentazioni digitali di manufatti architettonici

Pionieri e, tuttora, riferimenti indiscussi nella strutturazione semantica

delle rappresentazioni digitali di architetture è il gruppo di studiosi del *Centre National de la Recherche Scientifique, Unité Mixte de Recherche 3495 MAP - Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine* con sede a Marsiglia. Fin dai primi anni del Duemila, il laboratorio francese pone al centro delle proprie sperimentazioni il tema della relazione bilaterale tra geometria e semantica, che informa le riproduzioni tridimensionali di manufatti architettonici. Tutti gli interrogativi lasciati scoperti - o addirittura non ancora affrontati temporalmente - dai precedenti lavori sviluppati in campi disciplinari affini, divengono il cuore delle riflessioni che trovano una prima maturazione nel 2006 con il progetto NUBES¹.

Lo studio ha sviluppato il primo esempio di Sistema Informativo Semantico (De Luca, et al., 2007) o AIS *Architectural Information System* (Moscati, 2012) ovvero uno strumento critico che consente di raccogliere, organizzare, gestire, visualizzare e interrogare tutti i tipi di informazioni connesse con un modello, esplorato a scala architettonica, senza decontestualizzarle rispetto all'oggetto di architettura. L'analisi digitale delle architetture è basata sulla semantica che codifica le relazioni che possono essere stabilite tra le rappresentazioni tridimensionali degli edifici storici (da cui si deducono informazioni diversificate su forma, dimensioni, stato di conservazione, ipotetica ricostruzione) e i dati eterogenei afferenti a vari settori (tecnico, documentario o storico). Il principale obiettivo di NUBES è di fornire agli utenti una piattaforma web in cui organizzare rappresentazioni multiple e i dati ad esse associati, attorno ad una descrizione semantica del modello, con la finalità di definire un sistema informativo per analisi multidisciplinari del patrimonio costruito.

Lo scopo è raggiunto grazie alla formalizzazione di una rigorosa impostazione teorica e metodologica, che prende l'avvio dal riconoscimento di alcune questioni basilari nell'avvicinamento della semantica alla geometria nel dominio dell'architettura.

Le prime teorizzazioni maturano nell'ambito della tesi di dottorato di Livio De Luca (De Luca, 2006) interessatosi di collegare la semantica alle forme architettoniche classiche. Gli esiti delle sue analisi confluiscono nel progetto NUBES che codifica e rende disponibile alla comunità di ricercatori gli avanzamenti scientifici prodotti.

La relazione semantica-geometria in architettura impone di considerare, in primo luogo, l'edificio come un sistema di conoscenza architettonica da cui estrarre un modello di descrizione e definire le possibili rappresentazioni delle forme. Un sistema di conoscenza architettonica è una collezione di elementi strutturati, risultanti dalla combinazione di sotto parti espresse attraverso relazioni geometriche e topologiche, identificate da un

vocabolario preciso ovvero quello dell'architetto.

Le logiche di combinazione degli elementi, una volta definito - tra tutti i possibili - il tipo di relazione che li aggrega², dipendono dallo scopo della analisi, il quale a sua volta influenza e condiziona anche il tipo di rappresentazione più idonea a veicolare i contenuti della indagine.

Uno studioso interessato, ad esempio, all'investigazione di un sistema porticato dal punto di vista strutturale, sarà votato a selezionare gli elementi costitutivi del sistema architettonico e raggrupparli in relazione allo schema delle forze che si generano sotto carico, vagliando tra tutte le possibili rappresentazioni del modello (nuvola di punti, poligoni, superficie testurizzata, ecc.) quella più comunicativa per il tipo di analisi che sta conducendo. Parimenti, lo studio delle decorazioni, l'analisi dei materiali e così via, comporteranno l'associazione di elementi a concetti e relazioni diversificate, visualizzate con rappresentazioni differenti ma ciascuna pertinente allo scopo. Ne consegue che sul piano della identificazione delle unità di caratterizzazione semantica non esiste una sola scomposizione e segmentazione del modello. Ogni scomposizione morfologica è relativa ad un tipo di indagine.

Il primo elemento di innovazione, pertanto, introdotto dagli studi di De Luca è enucleato nella formulazione del concetto del *Point of view* (De Luca, et al., 2011) che determina la strutturazione di modelli tridimensionali semanticamente arricchiti.

Un punto di vista include, come risulta ora evidente, tre aspetti:

- l'uso di un vocabolario per isolare elementi dall'edificio;
- l'identificazione di una logica rilevante per il raggruppamento di questi elementi in una unità coerente;
- la scelta di un tipo di rappresentazione capace di estrarre, dai dati raccolti, le informazioni necessarie per le analisi.

In linea con questi principi, viene costruito attorno alla morfologia dell'edificio, un modello descrittivo definito da tre livelli distinti: decomposizione, strutturazione e rappresentazione.

Il primo livello consiste nello scomporre la morfologia dell'edificio in elementi e sotto-elementi, isolando concetti e associandoli alle corrispondenti parti della forma, secondo un preciso vocabolario.

Il secondo livello permette di stabilire un grafico di relazioni tra questi concetti, istituendo rapporti gerarchici tra le entità in funzione dell'obiettivo dell'analisi.

L'ultimo livello consente di associare differenti rappresentazioni geometriche alla stessa entità morfologica in accordo a differenti obiettivi

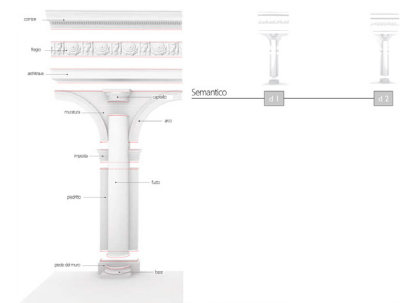


Fig. 2.1.1. Livello di scomposizione semantica.

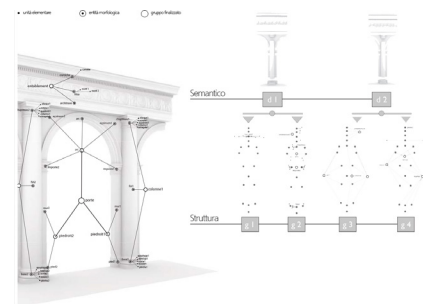


Fig. 2.1.2. Livello di segmentazione.

di descrizione.

Per la nomenclatura delle entità della descrizione, condotta nel primo livello per l'individuazione delle forme puntuali da associare a concetti, è usato come tesoro, contenente termini e loro definizioni, l'«*Architecture vocabulaire. Principes d'analyse scientiique*» di Perouse de Montclos del 1972, che organizza i termini che descrivono elementi architettonici in relazione a due criteri: il primo è l'identificazione dei termini relativi alle parti che compongono un edificio; il secondo è l'identificazione di un vocabolario specifico per i tipi di edifici³. L'utilizzo di questo dizionario, come specificato successivamente, sebbene evidenzi l'esistenza di vocaboli e concetti precisi del dominio dell'architettura, rappresenta al contempo un limite per l'approccio teorizzato fino a questo momento. Limite che verrà superato dallo stesso gruppo di ricerca negli anni successivi, con il progetto MONUMENTUM e la piattaforma AIOLI, di cui si dirà più avanti.

Il grafo di descrizione semantica, definito nel secondo livello, è una rappresentazione simbolica, nello spazio tridimensionale, delle relazioni parti-tutto stabilite tra gli elementi isolati, chiaramente ispirato alla strutturazione logica introdotta da Heine nel 1999 (Heine, 1999), ovvero un grafico ad albero, tridimensionale, la cui configurazione dipende dalla manipolazione delle relazioni gerarchiche stabilite tra un insieme di termini presenti in un elenco. Il grafo di relazioni è composto da tre tipi di nodi:

- entità morfologiche (concetto identificato dall'utente a cui possono essere associate diverse rappresentazioni geometriche - per esempio il capitello);
- gruppo finalizzato (gruppo che unisce più entità morfologiche e che non ha una rappresentazione geometrica - ad esempio la colonna);
- riferimento (è un aspetto particolare all'intero dell'entità - ad esempio l'echino).

Definita la decomposizione, nel primo e secondo livello, una procedura automatica nella piattaforma operativa di NUBES produce una prima descrizione associando a ciascun concetto isolato un nodo entità morfologica in una lista di termini e generando il simbolo corrispondente nello spazio 3D. Il simbolo si posiziona al baricentro di una forma semplificata che ingloba l'entità. I nodi della rappresentazione digitale sono ottenuti come superfici poligonali modellati ex novo in appositi software (come Maya). Gli oggetti tridimensionali così processati sono importati nello spazio 3D della piattaforma NUBES sviluppata in Virtools

DEV. Qui ogni oggetto può essere visualizzato e manipolato utilizzando come *pivot* e punti di ancoraggio, il baricentro e i vertici della primitiva geometrica - una *bounding box* - che ne racchiude il volume.

L'utente può organizzare l'entità nell'elenco dei termini, introducendo i vari nodi (gruppo e riferimento). La creazione di un gruppo corrisponde alla creazione di un concetto che riunisce entità: nello spazio 3D un simbolo tridimensionale è creato al baricentro della forma che ingloba tutte le entità comprese nel gruppo. Per creare un riferimento invece l'operazione è manuale: occorre selezionare nello spazio un punto della superficie dell'entità morfologica.

Il sistema studiato consente quindi la connessione tra geometria e semantica secondo diversi approcci interattivi dell'utente, reso in grado di operare sia sul modello digitale nello spazio tridimensionale che sul grafo di strutturazione semantica.

Il terzo livello struttura la questione connessa alla necessità di utilizzare tipologie di rappresentazioni differenti laddove non è pensabile che ogni tipo di indagine possa essere esaustivamente e immediatamente comunicabile e comprensibile con una unica forma di visualizzazione. Viene prioritariamente chiarita, in questo contesto, la distinzione tra risoluzione e rappresentazione: alcuni studi precedenti intendevano la multi-rappresentazione come sfruttamento dello stesso modello 3d con diversi livelli di complessità poliedrica. L'analisi del patrimonio richiede, piuttosto, tecniche di rappresentazione che sfruttano le basi geometriche diversificate su cui si fonda un modello architettonico e rese disponibili dalle tecniche di rilievo e modellazione: nuvole di punti, modelli basati su curve, modelli basati su poligoni, ecc.

A partire, quindi, dalle tre basi geometriche possibili (punti, curve, poliedri) vengono formulati diversi tipi di rappresentazione, da selezionare in funzione della tipologia di descrizione che permettono, della tecnica necessaria per l'elaborazione e della informazione che veicolano. Le rappresentazioni basate su punti si distinguono in: nuvola di punti semplice in tonalità di grigio, nuvola di punti colorata e carta di profondità. Le rappresentazioni basate sulle curve includono quella strutturata con profili e quella che restituisce dati dimensionali. Le rappresentazioni basate su poligoni si distinguono in visualizzazione dei poligoni con render ombreggiato (piatto o interpolato) e visualizzazione fotorealistica degli stessi con applicazione di textures⁴. La scelta, per esemplificazione, di una rappresentazione basata su poliedri risulta efficace se l'intento è quello di esprimere il volume dell'elemento architettonico e arricchirne l'informazione riproducendo l'aspetto visivo delle sue superfici. La volumetria, senza indicazione di colore, può essere resa attraverso due tipi

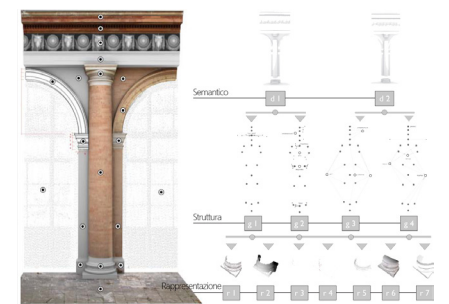


Fig. 2.1.3. Livello di rappresentazione.

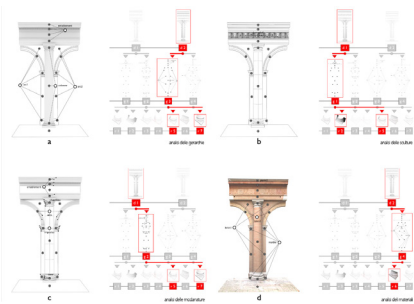


Fig. 2.1.4. Sintesi del concetto di *Point of view*.

di rendering, piatto o interpolato, a seconda della precisione di calcolo e restituzione del comportamento dei poligoni rispetto alla luce, da preferirsi singolarmente in funzione del grado di realismo che si vuole ottenere. La restituzione fotorealistica degli edifici, ottenuta attraverso la proiezione sul modello poligonale di immagini come texture, può fornire, invece, un utile supporto per la interpretazione e valutazione dello stato di conservazione dei materiali da costruzione.

Le rappresentazioni multiple, i dati grezzi delle forme spaziali e le informazioni eterogenee ad esse connesse, sono strutturate in un database relazionale SQL.

La soluzione offerta mostra come questi studi siano da considerarsi dei riferimenti prioritari per la ricerca della strutturazione semantica di modelli di architettura digitale, se si evidenzia come gli stessi si siano posti problemi e trovato risposte, in tempi avanguardistici rispetto alle ricerche che seguiranno e che si interrogheranno sui medesimi aspetti.

Per riassumere, secondo il modello di strutturazione semantica proposto dal MAP, ogni elemento geometrico può essere associato ad una definizione semantica, mentre una definizione semantica può essere associata a diversi elementi geometrici. Il modo in cui il modello tridimensionale viene scomposto in parti singolarmente definibili varia a seconda dello scopo dell'analisi e delle dimensioni dell'oggetto (ad esempio, un castello può essere scomposto nelle parti macroscopiche che lo compongono: torri, ponti, cortili, mura, ecc., oppure nei suoi elementi architettonici: pareti, tetti, finestre, ecc.).

Questa descrizione a tre livelli risulta vincente laddove conferisce un importante grado di libertà nello sfruttamento dei dati ottenuti dalle fasi di rilevamento: a partire dallo stesso modello geometrico si possono estrarre varie descrizioni semantiche sfruttando un sistema multi-rappresentazione. Inoltre, diviene il comune denominatore per stabilire relazioni bilaterali tra la morfologia dell'oggetto e le molteplici risorse documentali.

Il protocollo di strutturazione semantica delle rappresentazioni digitali di manufatti architettonici, fin qui teorizzato, è stato perfezionato - negli anni a seguire - per condurre riflessioni sempre più profonde e rigorose sulla determinazione di relazioni coerenti e continue tra tutti i dati eterogenei che possono essere utilizzati per l'analisi, la comprensione e la descrizione dello spazio costruito.

Un carattere innovante del metodo dei francesi è la specificazione della possibilità di stabilire una relazione tra i dati non soltanto sul piano puramente ipertestuale o ipermediale ma anche sul piano geometrico/

spaziale. Invece di utilizzare i legami di tipo entità-relazione tra forme rappresentate e conoscenze collegate (nozione fondante di diversi progetti contemporanei e anche posteriori incentrati su sistemi informativi geografici, applicazioni ipermediali, servizi di annotazione semantica), viene compresa la potenzialità di sfruttare la relazione proiettiva come via di comunicazione, di distribuzione e di propagazione dell'informazione tra le differenti rappresentazioni della stessa forma (De Luca, 2011).

Nel progetto LOCUS IMAGINIS⁵ del 2011, è stata teorizzata la distribuzione di descrizioni semantiche tra rappresentazioni 3D e 2D interconnesse, sviluppando l'architettura di una piattaforma interattiva e collaborativa che fornisce l'accesso ad informazioni culturali riguardanti monumenti, a partire da fotografie istantanee scattate dagli utenti. La relazione spaziale/proiettiva tra rappresentazioni 3D e 2D è stata sfruttata per qualificare immagini bidimensionali a partire da modelli tridimensionali. Le risorse 2D, siano esse fotografie che informazioni iconografiche, vengono orientate su un modello tridimensionale strutturato e da questo ereditano le annotazioni semantiche. Il metodo, derivato dal modello di descrizione semantica precedentemente descritto, si articola parimenti in tre livelli processuali:

- referenziazione delle fonti;
- modellazione semanticamente strutturata;
- annotazione semantica delle immagini.

Il processo di referenziazione delle fonti si articola in due momenti principali: il primo si interessa di stabilire una relazione proiettiva tra l'iconografia e il modello rappresentativo dello stato corrente dell'edificio, attraverso una procedura di resezione spaziale⁶. L'operazione richiede la conoscenza della geometria associata alla camera, reale o virtuale, con la quale la fonte iconografica è stata registrata nonché il posizionamento e l'orientamento della stessa⁷ (Stefani, et al., 2013). Il secondo momento consiste nell'usare una procedura che permetta all'utente di connettere attributi temporali all'immagine. Questi attributi includono, in accordo con il tipo di immagine, la data di creazione e lo stato descritto dal fotogramma. La data di creazione può essere conosciuta precisamente per esempio attraverso le istantanee, altrimenti viene inserita manualmente. Lo stato, che rappresenta un periodo nel quale il manufatto non è stato soggetto a cambiamenti, è caratterizzato dalle date di inizio e fine, e viene inserito manualmente dall'utente, se conosciuto.

La strutturazione del modello tridimensionale, basata sull'iconografia

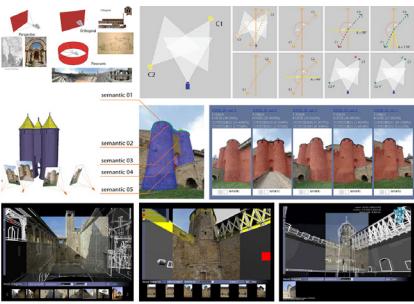


Fig. 2.1.5. Distribuzione di descrizioni semantiche tra rappresentazioni 3D e 2D.

ovvero in accordo a criteri spazio-temporali, avviene a partire dall'acquisizione di dati derivanti da rilievi laser scanner e/o fotogrammetrici. L'organizzazione delle informazioni rispetto al tempo è possibile attraverso l'uso di tecniche differenti che dipendono dal tipo di documenti disponibili: in caso di vecchie fotografie o dipinti antichi, la rappresentazione tridimensionale viene comparata con le immagini bidimensionali spazializzate e, in accordo con le informazioni visive contenute nell'immagine, si procede con la modellazione; in caso invece di fotografie attuali in alta risoluzione, la rappresentazione tridimensionale viene comparata alle immagini bidimensionali spazializzate e strutturata in accordo alle stratificazioni leggibili sulla superficie di ogni costruzione. Questo processo viene facilitato grazie alla personalizzazione di strumenti di modellazione che permettono l'assegnazione di attributi spaziali e temporali contemporaneamente alla creazione, modifica ed eliminazione della geometria.

L'annotazione semantica delle iconografie, infine, definisce l'innovatività della ricerca. Essa non si basa sulla annotazione diretta di concetti semantici su aree specifiche di ogni singola immagine. Bensì, i modelli tridimensionali, annotati semanticamente a livello morfologico, sono usati come tramite per assegnare informazioni semantiche all'immagine. La relazione tra modelli tridimensionali e immagini bidimensionali, creata precedentemente grazie alle procedure per la referenziazione spaziale dei fotogrammi, permette operativamente di allineare le immagini al modello tridimensionale. In questo modo, il contorno del modello viene proiettato sulle immagini 2D con l'obiettivo di sovrapporre un livello semantico all'immagine originale, prodotto dalla proiezione dell'estensione spaziale del modello tridimensionale, associato a una entità morfologica della descrizione semantica.

La relazione proiettiva così stabilita, tra la rappresentazione 3D e la fonte iconografica spazializzata, fornisce interessanti procedure automatiche per aggiungere e aggiornare semanticamente le annotazioni: in caso di aggiunta o cambiamento della descrizione morfologica tridimensionale, la nuova descrizione viene riproiettata sull'immagine; in caso di referenziazione spaziale di una nuova immagine, la descrizione morfologica dell'edificio viene automaticamente proiettata sulla fotografia (Stefani, et al., 2012).

La piattaforma di lavoro che è stata sviluppata permette, sulla base delle fasi operative suddette, un alto livello di coinvolgimento non solo di utenti esperti ma anche dei fruitori più comuni del patrimonio costruito. Attraverso la sua interfaccia, è possibile raccogliere le immagini scattate dai visitatori che, in primis, vengono aggiunte in un database; in un secondo momento, sono posizionate su un modello tridimensionale

digitale del monumento e annotate semanticamente, fornendo l'accesso ad informazioni sia grafiche che testuali. Quando il visitatore consulta il database e seleziona le immagini, queste vengono sovrainpresse su una scena tridimensionale, rendendo possibile l'interazione sia con le immagini che con il modello tridimensionale stesso per evidenziare le parti dell'edificio e per visualizzare informazioni di testo⁸.

La relazione spaziale/proiettiva tra rappresentazioni bidimensionali e tridimensionali è stata sfruttata, dallo stesso gruppo di ricerca, per la caratterizzazione semantica di immagini bidimensionali al fine di strutturare delle rappresentazioni tridimensionali da esse dipendenti.

In Manuel et al., viene specificata meticolosamente una metodologia per trasferire automaticamente le annotazioni fatte su una singola fotografia ad altre immagini dello stesso set fotografico, sfruttando le coordinate 3d dell'immagine e la profondità dei pixel.

Per ogni pixel di un fotogramma sono registrate le coordinate spaziali in un file .tiff in cui ai tre livelli di colore sono associate coordinate spaziali x,y,z. L'annotazione di una area su una immagine, che si concretizza in una maschera bianca su fondo nero, è definita quindi da una tripletta di coordinate spaziali x,y,z per ciascun pixel fotografico di cui si compone l'area. Se ne ricava un listato di cui è possibile visualizzare il modello digitale della porzione annotata nello spazio tridimensionale, ove una nuvola di punti complessiva viene strutturandosi secondo i criteri metodologici della tecnica fotogrammetrica⁹. Le coordinate x,y,z dell'area di fotografia campionata, vengono confrontate con le coordinate x,y,z di tutte le altre immagini del set fotografico. Quando il sistema computerizzato trova una corrispondenza, questa viene registrata con valore "True", in caso contrario, viene attribuito il valore "False". Una nuova maschera viene definita in cui al colore bianco è associato il valore positivo e al nero quello negativo. Il risultato finale è la generazione di nuvole di punti che risultano semanticamente strutturate, a partire dalla segmentazione di fotogrammi (Manuel, et al., 2013; Manuel, et al., 2014).

In tempi più recenti, la relazione proiettiva e spaziale esistente tra rappresentazioni bidimensionali e tridimensionali è stata ottimizzata per l'integrazione di un insieme di acquisizioni spazializzate (metriche, radiometriche, termografiche, ecc.) finalizzate all'elaborazione di supporti di analisi dei fenomeni di degrado delle superfici. Le ricerche maturate in questa direzione si pongono, a ben guardare, come summa di tutte le teorizzazioni e sviluppi fin qui definiti, con un significativo avanzamento scientifico che è confluito operativamente nel progetto

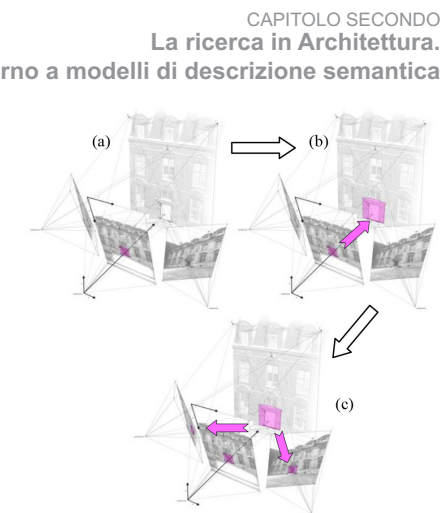


Fig. 2.1.6. Fasi del processo di trasferimento delle annotazioni: (a) definizione dell'annotazione sull'immagine centrale, (b) ricerca delle coordinate X, Y e Z dell'area, (c) proiezione sulle altre immagini dello stesso set fotografico.

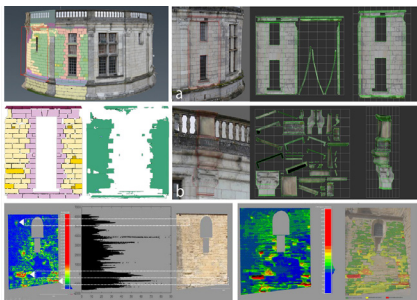


Fig. 2.1.7. Annotazione di fenomeni di degrado.

MONUMENTUM¹⁰.

L'investigazione mira a mobilitare varie discipline - architettura, conservazione, restauro, meccanica e scienze dell'informatica - per definire un nuovo flusso di elaborazione delle informazioni - tra cui indagini metriche, analisi delle superfici, modelli geometrici delle strutture, gestione dei dati eterogenei come fonti documentarie, stati temporali, ecc. - che sia congiunto, condiviso e versatile.

La metodologia ingloba le impostazioni già maturate negli anni precedenti laddove il punto di inizio è la generazione di modelli digitali sulla base di nuvole di punti semanticamente annotate a partire dalla segmentazione di fotografie. Il processo di annotazione recupera la codificazione del collegamento bidirezionale 2D/3D introdotto tra i pixel delle immagini e le loro coordinate tridimensionali per cui una sola immagine dell'insieme viene annotata e la relazione 2D verso 3D estrae la corrispondente nuvola di punti tridimensionale dell'area specificata. Le aree corrispondenti sulle altre immagini dell'insieme del set fotografico vengono quindi recuperate utilizzando la relazione 3D verso 2D. In questo modo è possibile annotare tutte le immagini contemporaneamente anziché una per una. Una volta segmentate le fotografie e quindi circoscritte aree che hanno una propria definizione spaziale, è possibile estrarne informazioni quantitative e associare dati qualitativi. Le regioni specificate possono essere utilizzate per estrarre valori dimensionali quali l'estensione superficiale, la posizione nello spazio tridimensionale, l'orientamento, la grandezza, fornendo così conoscenze sulla perdita di materiale e altro (Messaoudi, et al., 2016). In aggiunta, le annotazioni possono essere correlate con dati, memorizzati nel database, non solo di tipo quantitativo ma di definizione anche qualitativa. Una ontologia con relativo tesoro è stata predisposta per il progetto avente come dominio specifico di applicazione il degrado dei materiali lapidei. L'avanzamento rispetto agli studi precedenti (si veda NUBES) risiede nell'uso di glossari e ontologie non più limitate all'ambito nazionale ma formalizzate e adottate a livello scientifico internazionale, nel settore specifico del patrimonio culturale. I concetti relativi alla descrizione dei degradi delle pietre e i loro legami sono recuperati, pertanto, dal glossario dell'ICOMOS¹¹ integrato all'ontologia di alto livello CIDOC-CRM¹² tramite l'editor ontologico più diffuso, Protegè¹³. Tuttavia, il limite resta il riferimento, per i termini generali dell'architettura, a vocabolari troppo circoscritti all'ambito territoriale di intervento del gruppo di ricerca¹⁴.

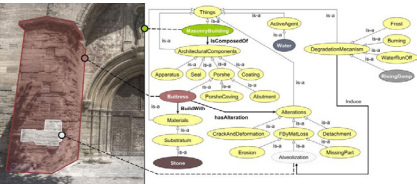


Fig. 2.1.8. Esempio di dominio ontologico dedicato al monitoraggio dell'alterazione dell'edificio in muratura: fenomeno di alveolizzazione.

Un ulteriore e interessante obiettivo di MONUMENTUM è stata la progettazione e sviluppo, attualmente in versione beta, di una piattaforma web aperta ed estensibile per la capitalizzazione e la gestione delle

Formalismi e metodi per l'organizzazione di forme spaziali attorno a modelli di descrizione semantica

conoscenze necessarie per la comprensione e l'analisi dei fenomeni di degradazione che interessano gli edifici storici. Il *tool*, chiamato AIOLI¹⁵, si profila come un sistema informatico informativo 3D di tipo *Cloud Service* con una interfaccia web che consente l'interazione 2D/3D, in cui alcuni moduli di calcolo - ad esempio per la propagazione delle annotazioni tra set spazializzati di fotografie e spazio tridimensionale e la successiva generazione del modello 3D¹⁶ - sono già inseriti.

L'intento è quello di mettere da parte il modello tridimensionale e lavorare su supporti fotografici. Dati quindi fotogrammi che l'utente può caricare e aggiornare di volta in volta, lo stesso utilizzatore può creare un *layer* di descrizione e, semplicemente con un mouse o una penna, fare delle annotazioni che saranno presenti non soltanto sulle immagini ma anche sul modello che a partire da queste viene a determinarsi. Inoltre, le annotazioni risultano direttamente legate a specifiche entità del sistema informativo che possono essere qualificate con attributi personalizzati, con termini di vocabolario, ecc. La componente ancor più interessante è che basta cambiare punto di vista o acquisire una nuova fotografia, che l'annotazione viene automaticamente riproiettata sull'immagine, in un continuum di informazioni e dati tra le varie inquadrature di un modello. Modello - sotto forma di nuvola di punti e/o di superficie poliedrica - che, quindi, non esiste a priori ma si genera, tramite un calcolo remoto, in funzione delle annotazioni¹⁷.

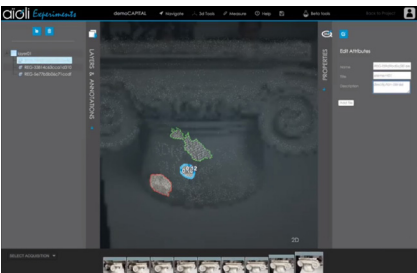


Fig. 2.1.9. Sistema di annotazione in AIOLI.

**2.2 Approcci H-BIM e semantica:
la parametrizzazione di componenti architettonici
come sistema di classificazione delle informazioni**

L'ambito di ricerca analizzato, che nasce dall'esigenza di strutturare, in maniera rigorosa, i molteplici paradata¹⁸ associati all'oggetto architettonico attraverso modelli di descrizione semantica, pone in essere la necessità di esaminare l'evidente relazione che intercorre tra lo stesso e l'approccio noto come *Building Information Modeling* - BIM.

Spesso, in campo architettonico, quando si parla di semantica, si associa l'idea della scomposizione di un sistema di architettura nei suoi componenti semanticamente significanti, ai processi formulati dalla filosofia del Building Information Modeling. Tale associazione è legata al fatto che, eccettuati i lavori del gruppo di ricerca del MAP di Marsiglia, il tema della annotazione semantica in architettura è affrontato quasi unicamente in ossequio alla filosofia BIM.

Il Building Information Modeling, con la parametrizzazione degli

elementi di base di una architettura, rappresenta, senza dubbio, un sistema di classificazione semantica delle informazioni associate alle forme geometriche. Tuttavia, il livello di strutturazione semantica e di interconnessione tra i dati che consente, non lo rende l'approccio di annotazione più adeguato per la ricerca di modelli di arricchimento che siano robusti, flessibili e interoperabili.

L'aspetto con il quale gli edifici si presentano, il modo in cui funzionano e le tecnologie mediante le quali vengono costruiti, si possono compiutamente “raccontare” per mezzo di un modello digitale: il patrimonio conoscitivo che sta dietro una costruzione si presta infatti ad essere amministrato secondo criteri gestionali propri delle basi dati informatiche (Mingucci, 2008). È questa disponibilità all'aggregazione delle informazioni l'essenza intima del BIM, dove l'ordinamento e la semantica propria dei componenti edilizi sono combinati in un archivio interattivo multidisciplinare (Garagnani, et al., 2011a).

La nascita del Building Information Modeling risale ai primi anni Settanta. Nel settembre 1974, con un documento di ricerca interno intitolato “*An Outline of the Building Description System*”, Charles Eastman ed alcuni altri autori della *Carnegie-Mellon University* di Pittsburgh (USA) gettano le fondamenta per la modellazione parametrica degli edifici, oggi diffusa a livello mondiale come metodologia BIM. Eastman e colleghi codificano un sistema descrittivo per edifici ovvero il *BDS Building Description System*¹⁹. Si tratta, in sintesi, della proposta di un software che gestisce singoli elementi di libreria che possono essere aggregati per generare un modello di edificio completo, attraverso un'interfaccia grafica che opera per proiezioni ortogonali e assonometrie. Ogni oggetto contiene la propria descrizione geometrica e alcuni dati informativi pertinenti al materiale del quale è composto, gli estremi dei fornitori e le proprie caratteristiche tecniche. Il sistema si proponeva di risolvere criticità di progetto che ancora oggi affliggono i metodi di progettazione tradizionali: ridondanza di informazioni presenti nei disegni, conflitti causati da mancanza di aggiornamento simultaneo e assenza di controllo nella documentazione del modello globale dell'edificio in progetto.

Seppure sperimentale e semplificato di molto rispetto agli obiettivi che si proponeva, il lavoro svolto alla Carnegie-Mellon permetterà a Eastman di scrivere un articolo l'anno successivo sul prestigioso *A.I.A. Journal* nel quale introdurrà il concetto di *Building Information Model* coniando un acronimo, quello di BIM, che negli anni a venire diventerà diffusissimo²⁰. L'approccio BIM è oggi definito dalla NIBS *National Institutes of Building*

Science come la “rappresentazione digitale di caratteristiche fisiche e funzionali di un oggetto”.

Il termine viene utilizzato per indicare modelli architettonici tridimensionali di nuova generazione che non si limitano al disegno di elementi grafici semplici (linee, polilinee, cerchi, archi, ecc.), ma consentono di progettare disegnando i componenti tecnici dell'edificio (muri, strutture portanti, finestre, porte, ecc.) come oggetti tridimensionali e parametrici. Uno degli aspetti propri della modellazione BIM risiede, infatti, nella possibilità di disegnare elementi già tridimensionali, a partire da viste in due dimensioni. Come evidenziato da Edgar e Smith, è molto più immediato concepire uno spazio architettonico tracciando profili di pareti e delimitando superfici in una vista di pianta piuttosto che formalizzarne gli aspetti direttamente in 3D (Edgar, et al., 2008). I software di modellazione BIM, pertanto, si incaricano di generare un modello nelle tre dimensioni a partire dalle proiezioni ortogonali, dal momento che l'informazione riguardante la dimensione in alzato è già cablata all'interno della tipologia di oggetti che i programmi amministrano. Il secondo aspetto fondante della filosofia BIM, infatti, è la modellazione di edifici attraverso l'utilizzo di oggetti parametrici, presenti in librerie implementate nei programmi di modellazione, con proprietà caratterizzate da variazione ed associatività. Ogni oggetto è regolato da uno o più parametri su cui è impostata la sua generazione geometrica. La variazione di valore del parametro, consente la produzione di differenti configurazioni della medesima tipologia di oggetto. La modificabilità variazionale degli oggetti non altera i vincoli di associatività con il contesto ovvero non inficia la rete di connessioni semantiche e di relazione con gli altri elementi che definiscono il complesso sistema architettura²¹.

In ragione di queste proprietà, gli oggetti di base della modellazione BIM sono definiti *intelligenti* poiché in grado di stabilire delle relazioni con gli altri componenti del modello: gli elementi introdotti non sono quindi solo oggetti grafici tridimensionali in grado di rapportarsi tra loro in una logica di aggregazione/montaggio, costituiscono invece una rappresentazione specifica del componente tecnologico che identificano. In questo modo una finestra, ad esempio, non sarà una semplice sottrazione booleana sull'oggetto parete eseguita per generare un foro, ma da sola costituirà un elemento parametrico dotato di caratteristiche specifiche e appartenente ad un contesto preciso, in grado di coordinare correttamente le componenti parete/ apertura/ infisso/ vetro/ intonaco tra loro, valutandone le possibili interferenze e computandone numero ed estensione. L'oggetto finestra infatti sarà direttamente impostato sulla relazione con l'oggetto parete, che potrà avere caratteristiche variabili, come successive stratificazioni dei

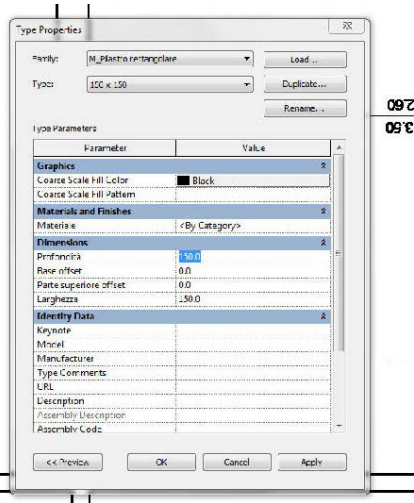


Fig. 2.2.0. Approccio di modellazione BIM. Ogni elemento modellabile appartiene ad una famiglia. Ogni famiglia contiene tipi diversi di elementi omogenei. In questo caso vengono modellati i pilastri come tipi specifici (di misure predeterminate) della famiglia “Pilastri”. Ogni oggetto intelligente è governato da proprietà associative che ne definiscono geometria, pertinenza e contesto.

materiali e consistenza diversa; al variare degli spessori il comportamento della finestra tuttavia rimarrà il medesimo (foratura adeguata e inserimento dei sottocomponenti infisso/vetro) essendo in relazione con la parete tramite l'”intelligenza” intrinseca del componente che si inserirà, a prescindere dalle caratteristiche di spessore, laddove la geometria rimarrà corretta (Garagnani, et al., 2011a). Secondo l'approccio BIM, una architettura può, dunque, essere scomposta nei suoi componenti di base, individuati come elementi parametrici, selezionati all'interno di “famiglie” di oggetti e inquadrati in un sistema di strutturazione di una rappresentazione architettonica intesa come collezione di entità semantiche già categorizzate (muro, finestra, porta, copertura, ecc.). Le famiglie, pertanto, sono settate come una raccolta di componenti parametriche, di “tipi”: possono contenere molte tipologie dei rispettivi elementi componenti, associate ad informazioni geometriche, di materiali, di contesto e di comportamento a sistema. Una famiglia può essere qualunque cosa, da un insieme di tavoli a un gruppo di finestre, da una selezione di porte ad un catalogo di bulloni (Garagnani, et al., 2011b). Consapevole della molteplicità e diversità dei componenti che definiscono una architettura, la ricerca sul BIM ha sviluppato negli anni soluzioni software in grado di supportare la modellazione di elementi personalizzati, non presenti e categorizzati già nelle librerie di partenza, inquadrandoli sempre all'interno delle famiglie semantiche di riferimento. La logica di generazione di componenti significanti ex novo, al di là del programma di modellazione BIM prescelto²², è impostata sul disegno del nuovo oggetto, di cui vengono definiti i parametri caratterizzanti la geometria generatrice e l'associatività, a partire dalle caratteristiche base della famiglia referente²³.

Per riassumere, un modello BIM contiene informazioni riguardanti l'edificio, scomposto nelle sue parti semanticamente significative, quali la localizzazione geografica, la geometria, le proprietà dei materiali e degli elementi tecnici, le fasi di realizzazione, le operazioni di manutenzione. Consente di integrare in un modello le informazioni utili in ogni fase della progettazione, da quella architettonica a quella esecutiva, (strutture, impianti, sicurezza, manutenzione, prestazioni energetiche, ecc.) e gestionale (computi metrici, distinte fornitori, ecc.). L'architettura è concepita come un sistema, una collezione di entità semantiche cui corrispondono elementi parametrici intelligenti, incardinati all'interno di famiglie di oggetti categorizzate. Ciascun elemento si configura dunque quale sintagma nella struttura grammaticale dell'architettura, connotandosi attraverso specificità di ruolo, di funzioni e di relazioni. La parametrizzazione del singolo componente formale consente la sua adattabilità a forme e profili

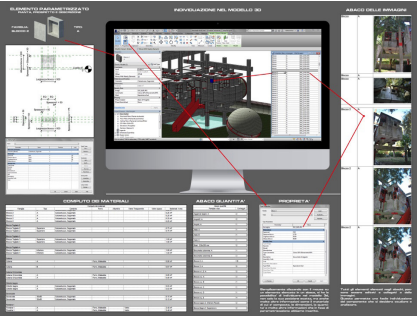


Fig. 2.2.1. Il modello BIM è al centro dei dati su un edificio cui, oltre alle informazioni standard, è possibile aggiungere, ad esempio, la documentazione fotografica e i dati sul degrado.

specifici, classificandolo, con un leggero grado di personalizzazione, in un insieme di relazioni di origine semantica ben definito. Ogni elemento ha una sola etichetta semantica, con specifici attributi sia geometrici che gerarchici. Alle componenti di un oggetto architettonico è possibile associare, in aggiunta, altre tipologie di informazioni, tra quelle diversificate che lo connotano e contraddistinguono, come immagini, link video, disegni storici, ecc.

Concepito per la progettazione di nuove architetture, ben presto si è avvertita la necessità di sfruttare le enormi potenzialità mostrate dalla modellazione parametrica anche nel campo del Cultural Heritage. Il processo BIM, latore di numerosi vantaggi per i progettisti che lo implementano nel proprio flusso di lavoro, può essere declinato con discreto successo anche alle casistiche applicative di intervento sul patrimonio architettonico esistente. La semantica tipica dei componenti dell'architettura storica, incontra nella struttura autocosciente degli “oggetti intelligenti” BIM un valido apparato di documentazione relazionale (Garagnani, 2012).

Nasce così l'*Historic Building Information Modeling* noto come H-BIM. La filosofia H-BIM parte dalla considerazione che i modelli geometrici tridimensionali che mostrano le condizioni fisiche in cui versano gli edifici storici sono i dati primari nel processo di documentazione e conservazione architettonica (Saygi, et al., 2013). Alla luce di ciò, il processo di modellazione parametrica HBIM inizia con la raccolta del corpus documentale del costruito storico enucleato, in considerevole parte, nella registrazione di dati metrici, morfologici e colorimetrici, condotta quasi nella totalità degli studi presenti in letteratura, con sistemi di rilievo TLS in associazione a processi di fotogrammetria digitale. A fronte dell'enorme quantità di dati acquisiti, la conseguente rappresentazione tridimensionale - una nuvola di punti - è un modello geometrico discretizzato, privo di intelligenza, che deriva da una selezione acritica dei dati di scansione, del tutto inconsapevole di ciò che rappresenta, delle entità geometriche di cui è composto e delle relazioni che intercorrono tra le parti. Per una efficace analisi e documentazione del patrimonio, la fase successiva contempla lo studio critico del modello 3D per il riconoscimento delle componenti formali significative e dei rapporti che regolano la connessione delle parti nel sistema unitario dell'edificio architettonico. Il processo si articola, sostanzialmente, in tre fasi: (i) segmentazione, (ii) strutturazione delle relazioni gerarchiche, (iii) arricchimento semantico.

La fase di segmentazione è orientata alla individuazione dei componenti architettonici e suddivisione, automatica, in regioni dei dati geometrici

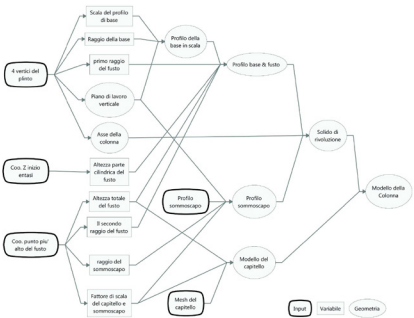


Fig. 2.2.2. Mappa logica della costruzione del modello parametrico di una colonna ionica.

delle nuvole di punti non strutturate, utilizzando diversi algoritmi di *clusterizzazione*. La segmentazione iniziale è impiegata come riferimento per la progettazione e costruzione di una libreria parametrica di oggetti. A partire dall'individuazioni dei componenti geometrici di base, il sistema architettonico è scomposto in elementi modellati all'interno dell'ambiente BIM come oggetti direttamente rappresentativi dei corrispondenti elementi dell'architettura e caratterizzati da proprietà, regole, parametri che ne gestiscono le variazioni tipologiche e le specifiche relazioni semantiche. Il prodotto finale è un modello tridimensionale completo dall'alto potenziale informativo, ove è possibile associare alla rappresentazione tridimensionale dati descrittivi di diversa natura. Il modello è costituito da oggetti parametrici, basato su dati storici, mappati a partire da una nuvola di punti, cui sono associate informazioni di vario tipo, relative anche ai metodi di costruzione e alle consistenze materiche.

In questa prospettiva, è facilmente comprensibile come il BIM e l'H-BIM costituiscano una rappresentazione efficiente ed efficace per ottenere un modello semanticamente arricchito, ponendosi come referente non trascurabile per il campo di ricerca esaminato.

Ciò nonostante, esistono limiti e lacune nella accezione di “annotazione semantica” per la filosofia BIM.

Una prima osservazione a latere da fare, interessa le criticità che un approccio di modellazione parametrica manifesta nella pratica applicata al patrimonio storico costruito. Un recupero di edilizia storica infatti è molto diverso da un progetto di costruzione ex novo, soprattutto quando ben poco si conosce dell'esistente in merito a materiali e tecniche costruttive utilizzate. Modellare situazioni costruite, dunque, implica un'analisi approfondita dei componenti da replicare digitalmente, con notevoli difficoltà esecutive anche dal punto di vista geometrico, individuando morfologie non sempre riconducibili a vincoli variazionali ben definiti. Inoltre, la reale capacità di definire forme e strutture meno convenzionali, rimane un punto critico laddove l'approccio procedurale nella generazione di un componente non previsto nell'abaco di modelli del software di modellazione, non risulta del tutto fluido, comportando alcune difficoltà riconducibili ai limiti imposti da programmi che nascono per la progettazione del nuovo e che non appaiono sufficientemente flessibili ed adattabili alle specificità del costruito storico caratterizzato dalla continuità del sistema piuttosto che sulla aggregazione di componenti standardizzate.

L'impiego di librerie di oggetti parametrici personalizzabili non riesce poi, allo stato attuale, a coprire tutte le specificità del patrimonio storico. Nella realtà costruita, nessun elemento è perfettamente orizzontale o verticale.

In aggiunta, un manufatto è caratterizzato da componenti di forma variabile, che spesso perdono la loro somiglianza nel tempo a causa di deterioramenti e alterazioni (Yajing, et al., 2011).

Se il BIM rappresenta le fondamenta per l'annotazione semantica dei modelli digitali, gli studi analizzati nel paragrafo 2.1 mostrano un approfondimento dell'approccio parametrico, orientato a un miglioramento dello stesso.

Il sistema informativo semantico, cui le ricerche esaminate conducono, consente, difatti, una interrelazione e compenetrazione tra modello, semanticamente annotato e segmentato, e i paradata, a esso associati, più profonda e complessa di quanto sia attualmente possibile negli ambienti H-BIM.

Lo sforzo delle ricerche è orientato alla definizione di possibilità operative in grado di visualizzare i dati come un layout sovraimpresso all'oggetto architettonico, rendendo immediata la comprensione degli stessi e la relazione che questi istituiscono con la consistenza del manufatto nella sua configurazione contemporanea. Nel BIM, sebbene siano indiscusse le sue grandi potenzialità nello scambio di formati e nella interoperabilità, l'associazione tra il livello di descrizione geometrica e il livello di descrizione semantica è basilare. Se lo si analizza in funzione della modalità di strutturazione delle informazioni che offre, non si può non registrare il limitato collegamento che è possibile tra un oggetto e le risorse documentarie, annesse alle componenti formali come semplice link di rimando a banche dati esterne o come un allegato visualizzabile sotto-forma di immagine all'interno della scheda informativa dell'oggetto architettonico.

Il secondo aspetto riguarda la scomposizione del modello in parti in accordo a regole di descrizione semantica. La segmentazione di un sistema architettonico secondo logiche semantiche rigorosamente predisposte, rende possibile la consultazione delle informazioni ad esso connesse attraverso la formulazione di *queries* dinamiche: ad un elemento architettonico, possono essere associate caratteristiche di molteplice entità (materiale, età, localizzazione spaziale, dimensione geometrica, ecc), che diventano tutte parametri attraverso i quali interrogare la *maquette* tridimensionale. In questo modo, lo studio dell'oggetto di architettura non avviene semplicemente mediante la selezione delle singole parti/oggetti parametrici del BIM ma si spinge oltre, permettendo collegamenti molteplici cui pervenire attraverso il modello stesso che diventa così l'interfaccia tra informazioni e utente. Questo tipo di interrogazione è resa possibile dalla progettazione di robuste banche di dati predisposte a supporto del sistema semantico. Nella filosofia H-BIM, incentrata

sull'applicazione di software specifici, non è presente un repository di informazioni spazializzate, aperto e connesso ai dati del web semantico. Tutta la documentazione registrata ed etichettata nell'ambiente software di modellazione parametrica, è confinata all'applicativo specifico.

2.3 Discussione. Questioni aperte e prospettive di ricerca

Il significativo numero di ricerche, orientate alla digitalizzazione degli artefatti del patrimonio culturale, comprensivo delle manifestazioni architettoniche, condotte negli ultimi quindici-venti anni, mostra in maniera indiscutibile le potenzialità, per la documentazione e la condivisione tecnico-scientifica delle conoscenze connesse al costruito storico, dei sistemi - intelligenti, efficienti e scalabili - di indicizzazione, archiviazione, ricerca e navigazione delle collezioni tridimensionali, attraverso lo sviluppo e l'implementazione di annotazioni semantiche collaborative. L'analisi della letteratura di settore, fin qui condotta, ha rivelato una produzione considerevole di studi, ciascuno dei quali ha raggiunto e perfezionato un tassello nel campo, più vasto e generale, della ricerca sull'arricchimento semantico di rappresentazioni digitali. Il quadro generale degli approcci e metodologie formalizzate, a valle della *review*, può essere così sintetizzato:

- strutturazione di modelli tridimensionali considerati come unico oggetto oppure scomposti in parti e sotto-parti;
- possibilità da parte degli utenti di segmentare il modello arbitrariamente;
- impiego di supporti bidimensionali per l'individuazione dei descrittori geometrici semanticamente significanti;
- modellazione ex novo delle parti in cui il modello è scomposto;
- impiego di geometrie semplificate associate agli elementi primitivi di scomposizione;
- segmentazione dei modelli differenziata in funzione del punto di vista ovvero della finalità dell'analisi;
- associazione del modello e/o dei suoi componenti di base a termini formalizzati in dizionari o ontologie (a carattere nazionale o internazionale);
- etichettatura di parti dell'oggetto tridimensionale in riferimento a concetti rilevanti per un annotatore specifico;
- visualizzazione dinamica della annotazione a seconda del punto

Formalismi e metodi per l'organizzazione di forme spaziali attorno a modelli di descrizione semantica

- di vista;
- tipologie di rappresentazione diversificate;
 - trasferimento della annotazione a rappresentazioni multiple del medesimo modello digitale;
 - accessibilità tramite Web a servizi di etichettatura;
 - possibilità di annotazione in ambiente collaborativo;
 - raccolta, archiviazione e recupero delle annotazioni in banche di dati che sfruttano sistemi relazionali o triplete RDF.

Come già evidenziato, tutte le ricerche esaminate soddisfano uno o più aspetti senza riuscire ancora a fornire un sistema che contempli la risoluzione a tutti i requisiti, in una unica proposta operativa.

Tra gli obiettivi che gli studi precedenti hanno raggiunto, alcuni enucleano singoli potenzialità, latrici di opportunità di ricerca scientifica.

Il ricorso ad ontologie e dizionari di dominio, ancora occasionale nelle ricerche contemporanee, può risultare estremamente fruttuoso se strutturato con rigore e respiro internazionale. Quando un concetto semantico è estratto da un vocabolario di dominio controllato e inquadrato nelle relazioni di una ontologia formalizzata, l'annotazione diventa significativamente più ricca ed esplicita. Inoltre, l'associazione di termini, catalogati in un sistema relazionale ontologico e convalidati a scala internazionale, ad attributi di basso livello di componenti tridimensionali rende possibile l'inferenza semantica associando etichette di livello superiore. La selezione, poi, di ontologie e tesauri codificati come Linked Open Data - LOD²⁴, secondo linguaggi interpretabili fluidamente da Intelligenze Artificiali, facilita il ragionamento sull'elemento annotato e permette alle risorse di diventare parte del più ampio Web Semantico.

La pratica di segmentazione del modello digitale servendosi di supporti bidimensionali, da cui modellare ex novo gli elementi geometrici semanticamente significanti, indica un processo operativo sufficiente per rispondere a particolari esigenze di investigazione, proprie ad esempio della ricerca di restauro. Tuttavia, questo approccio non è condizione necessaria nella totalità delle tipologie di indagine e di analisi. La capacità, offerta dalle moderne tecnologie di rilevamento, di ottenere, a partire dalla registrazione dei dati di scansione, rappresentazioni tridimensionali in forma di superfici poligonali con caratterizzazione della texture materica, costituisce una opportunità da sfruttare. Il perfezionamento di sensori e protocolli procedurali, mette a disposizione dei ricercatori modelli poliedrici

trascrittori delle forme spaziali reali, estremamente fedeli e dall'elevato valore informativo. Anziché procedere con una nuova modellazione delle parti e sotto-parti di cui è composto il sistema architettonico o servirsi di supporti bidimensionali, come scatti fotografici, per segmentare una rappresentazione tridimensionale in ossequio a criteri semantici, un approccio più ragionevole potrebbe basarsi sull'uso dei modelli 3D di rilievo. Attraverso la interazione e manipolazione diretta della maquette digitale si generano osservazioni e annotazioni dirette, senza il filtro distanziatore della carta e della modellazione.

La codificazione dell'esistenza del "punto di vista" come logica per l'isolamento e raggruppamento di elementi primitivi in unità coerenti, declinata in funzione del tipo di analisi e della formazione dell'annotatore, rivela l'impossibilità di considerare univoca la definizione delle forme architettoniche. L'impressionante ricchezza del patrimonio costruito, l'eterogeneità dei suoi elementi costitutivi, i problemi legati alla terminologia come diversità linguistica e pluridisciplinarietà, la differente specializzazione dei professionisti coinvolti nel processo di documentazione del costruito storico, sono motivo di annotazioni incerte ed ambigue.

Allo stato attuale, gli approcci di segmentazione di un oggetto di architettura, in riferimento a un tesoro di concetti semantici, formalizzato per il dominio specifico di indagine, sottintende l'associazione puntuale di ogni elemento - considerato nella sua totalità o scomposto in parti e sotto-parti - ad un termine preciso del vocabolario di architettura. La procedura, quindi, si fonda sul principio di netta e univoca definizione e classificazione di un componente architettonico. Lo stesso principio del punto di vista, sebbene formalizzi la necessità di considerare gli oggetti di architettura selezionandoli in maniera differente in funzione dell'obiettivo dell'indagine, si traduce - nella pratica - in un differenziato raggruppamento degli elementi all'interno di uno schema di relazioni gerarchico-associative, in cui ciascun elemento è sempre ricondotto ad un concetto in modo inequivocabile.

La molteplicità delle architetture costruite dimostra, al contrario, l'esistenza di casi in cui non è possibile etichettare univocamente un componente architettonico, in virtù di una molteplicità di fattori che rientrano nell'essenza stessa del fare e costruire architetture. L'osservazione degli oggetti reali, rivela, per esemplificazione, il caso in cui, per la realizzazione di una colonna, l'ultima modanatura del capitello viene ad essere costruttivamente eseguita come un unico blocco materico, congiunto a tutte le modanature che specificano il capitello. Tuttavia, dal punto di vista strutturale, questa modanatura risulta essere elemento costitutivo del fusto. La segmentazione

del modello dovrà essere diversificata, conseguentemente, in funzione del tipo di analisi da condurre. Tale analisi permetterà, sì, di evidenziare la logica di relazione differente, in affinità allo scopo di indagine, ma non restituisce a priori la duplice associazione della modanatura a punti di vista diversificati, se non si vuole consultare la ricerca puntuale. In aggiunta, non è prevista la valutazione della rilevanza e/o pertinenza di un elemento rispetto ad un determinato concetto ovvero la modanatura in questione quanto è rilevante per il concetto di capitello (secondo l'analisi materica) e quanto lo è per quello di fusto (dal punto di vista strutturale). Altra possibile casistica in cui questo aspetto risulta stringente, si ritrova nello studio dei sistemi di copertura, a cupole e volte. Un campione, in questo ambito, è fornito dalla copertura della Sala dei Baroni del Maschio Angioino, a Napoli. La volta della sala è classificata fino ad ora dagli studiosi come volta stellata. Recenti studi²⁵, dedicati proprio alle cupole, hanno sollevato un dibattito sulla possibile lettura alternativa di questa volta la cui genesi geometrica è associabile a una superficie generata dalla rotazione di un quarto di circonferenza, proprio come accade per una classica cupola sferica. Volendo strutturare semanticamente il modello della Sala dei Baroni, si porrebbe immediatamente il problema di esplicitare non solo la duplice associazione della copertura a due concetti semantici differenti ma congiuntamente anche il grado di pertinenza della stessa rispetto a ciascuno dei due concetti.

Queste e altre esemplificazioni, pongono in luce, in sintesi, l'esigenza di prevedere, nella associazione di attributi semantici di rappresentazioni architettoniche, sistemi capaci di rendere evidente il grado di rilevanza di un determinato elemento - sia esso considerato nella sua interezza che segmentato in sotto-parti - in relazione a un determinato concetto.

Il tema dell'incertezza della annotazione si complica, poi, se si considera la formazione e la qualificazione professionale degli esperti di dominio. Ammettere che un componente di architettura si colleghi a termini semantici secondo diversi livelli di pertinenza e con relazioni molteplici, comporta la presa di coscienza della soggettività della valutazione. Classificare un oggetto attribuendogli un determinato peso rispetto ad un vocabolo, è una operazione che ciascun annotatore compie sulla base di una propria scala di valutazione che deve essere poi trasportata ad un determinato valore di una scala continua formalizzata. La diversa formazione dell'annotatore condiziona il modo di vedere e interpretare un medesimo episodio architettonico. Un restauratore tenderà a riconoscere e isolare componenti di architettura secondo logiche dissimili da un esperto di geometria. O ancora, un progettista avrà un approccio nella interpretazione della morfologia di un manufatto difforme dalla visione

di uno storico. La misurazione di questa incertezza valutativa può essere condotta, in termini scientifici, mutuando dalla linguistica dei corpora della personalità²⁶, gli approcci di riconduzione della soggettività ad un certo grado di relativa oggettività, considerando un numero *n* di annotatori e rappresentando l'incertezza in base al grado di accordo tra questi, con modelli probabilistici in grado di gestire le annotazioni di gruppi che siano ambigue o incomplete²⁷.

L'architettura informatica del sistema informativo e la strutturazione delle annotazioni influiscono notevolmente sulla interoperabilità delle risorse raccolte. Tutti gli studi finora proposti sono finalizzati alla raccolta, capitalizzazione, strutturazione e archiviazione del corpus informativo in banche dati la cui consultazione è operata o da esperti di settore e studiosi oppure rivolta ad utenti con profilazione generica. Il recupero delle informazioni avviene attraverso meccanismi propri dei repository relazionali ovvero schede con determinati campi informativi che un sistema informatico interroga e relaziona secondo gli specifici attributi compilati. La modalità di accesso ai contenuti digitali avviene per parole chiave, per ricerca semantica o per ricerca di similarità geometriche, resa possibile dalla codificazione di metodi di analisi semantica delle risorse che supportano l'attività di *browsing* e *retrieval* dei contenuti.

Alcuni progetti più recenti hanno iniziato ad assumere schemi di codificazione delle risorse secondo triplette RDF, per la gestione e recupero delle informazioni in banche di dati a grafo. Tale modello di rappresentazione dei dati risulta più agevole per la condivisione delle conoscenze ma presenta ancora dei limiti per l'interconnessione e amministrazione di grandi quantità di risorse.

Un avanzamento potrebbe contemplare la progettazione di database la cui architettura di sistema sia non solo interrogabile da parte di Intelligenze Artificiali ma capace di supportare il recupero delle informazioni in maniera molto più intuitiva e automatica, riuscendo a identificare connessioni multilivello tra i record raccolti estraendo percorsi, anche non immediati, con facilità. La consultazione della banca dati da parte degli utenti, in un sistema che sfrutti intelligenze artificiali, potrebbe spingersi oltre prevedendo la possibilità di progettare avatar 3D in grado di porsi come un mediatore, con un certo grado di fascinazione, tra il corpus conoscitivo e l'utente che interroga il repository. Questo tipo di applicazione risponderebbe pienamente al fervore intellettuale che sta animando negli ultimi anni la ricerca nel campo della divulgazione innovativa del patrimonio culturale. Si tratta di investigazioni e progetti orientati sempre di più alla trasposizione dei *videogames* nel Cultural

Heritage²⁸ ove la possibilità di interagire con avatar tridimensionali - resa possibile dallo sviluppo di intelligenze artificiali che interrogano le banche dati -, addirittura con linguaggio naturale, costituirebbe un avanzamento scientifico rilevante.

Le riflessioni maturate ed espresse più sopra, delineano alcune prospettive di ricerca possibili che la tesi ambisce ad affrontare, con lo spirito di esaminarle tutte in maniera trasversale, per approfondirne alcune in modo più strutturato.

Lo studio affronta la questione della incertezza dell'annotazione semantica di rappresentazioni digitali nel dominio dell'architettura puntando a formalizzare uno strumento in grado di raccogliere le etichettature ambigue e trasformare queste informazioni, di per sé grezze, in risorse documentative. L'approccio di semantizzazione è orientato a trasferire la dimensione del linguaggio alla componente spaziale ricorrendo ad ontologie standardizzate e tesauri di dominio controllato quali logiche di scomposizione dei modelli tridimensionali. Le osservazioni semantiche sono generate dalla interazione diretta con le rappresentazioni 3D e strutturate secondo linguaggi e modelli propri dei LOD, interpretabili da Intelligenze Artificiali in modo speditivo e reversabili nel web semantico.

Note

1 <http://www.map.cnrs.fr/nubes>; <http://www.map.cnrs.fr/ldl/recherche/nubes-2.html>

2 Nel suo studio, De Luca considera le relazioni parti-tutto a partire dalle teorizzazioni di Goulette (Goulette, 1999), il quale individua tre tipi di relazioni nel vocabolario dell'architetto:
- relazioni topologiche (posizionamento relativo di un elemento o parte di esso all'interno di dispositivo unitario);
- relazioni parti-tutto (relazioni gerarchiche: un elemento è parte di un tutto omogeneo che a sua volta è parte di una unità di ordine superiore); A loro volta si dividono in: - pezzo-tutto (singole parti di un elemento unitario. Ogni parte ha un suo nome (vedi capitolo);
- membro-collezione (relazioni di tipo tipologico, raggruppamento in funzione di criteri di comparazione, criteri stilistici, periodi storici e regioni geografiche); - componente-assemblaggio (criteri di proporzione, ritmo e simmetria);
- relazioni di composizione (insieme di regole che controllano il posizionamento e dimensionamento degli elementi all'interno di una trama geometrica generale). Di questo aspetto si dirà nel dettaglio nel capitolo 3.

3 Il vocabolario fu redatto su commissione del Ministère Des Affaires Culturelles ed è stato selezionato poiché riconosciuto a livello nazionale come un inventario generale dei monumenti e delle ricchezze antiche di Francia.

4 Dal punto di vista operativo, nella piattaforma di NUBES, le rappresentazioni

geometriche sono state salvate in formato ASCII. Per renderle gestibili dai motori di visualizzazione in tempo reale, sono state poi convertite in formato .nmo sviluppato dal software Virtools.

5 <http://www.map.cnrs.fr/ldl/recherche/locus-imaginis-2.html>

6 In riferimento alle modalità di connessione di un modello digitale con documenti grafici, diversi studi hanno esplorato la referenziazione spaziale di dati iconografici (fotografie, disegni, dipinti, ecc.). Essi spaziano da metodi manuali, basati sulla conoscenza e la registrazione della posizione delle camere (Kadobayashi, et al., 2005), a metodi semi-automatici (Waldhausl, et al., 1994), basati su soluzioni geometriche per la calibrazione e l'orientamento delle camere, o ancora a metodi automatici (Tsai, 1986), basati sull'analisi e il processamento di immagini. Questi ultimi metodi stimano il posizionamento e l'orientamento delle camere a partire dall'estrazione automatica dei punti di fuga (Lee, et al., 1992) o dei punti omologhi identificati sull'immagine (Snively, et al., 2006; Snively, et al., 2007). Tuttavia, questi lavori hanno mostrato che il recupero del corpus conoscitivo che favorisce la comprensione e l'analisi del patrimonio costruito, può essere significativamente migliorato da un lato, connettendo i dati iconografici all'edificio, e dall'altro lato, annotando semanticamente la morfologia del manufatto non solo come un unicum, ma anche in termini di parti e sotto-parti, con i loro attributi e relazioni.

7 Le fonti possono seguire differenti regole di proiezione: proiezione prospettica o altre tipologie di proiezioni. In caso di fotografie e disegni in prospettiva, per determinare la geometria della camera associata alla fotografia, sono necessarie una serie di corrispondenze da stabilirsi tra le fotografie bidimensionali e il modello tridimensionale. Il modello geometrico della camera è definito a partire dalla lunghezza focale e distorsione - che rappresentano dei parametri intrinseci - e dalla traslazione e orientamento - parametri estrinseci - relativi all'immagine.

Nel caso di disegni come quelli tecnici (piante, prospetti, sezioni), che sono basati su proiezioni cilindriche, sono sufficienti tre corrispondenze 2D/3D per determinare la scala della fonte iconografica in uno spazio di lavoro tridimensionale e per determinare il piano di riferimento della proiezione. Una volta che questo piano è definito, esso può essere spostato lungo la linea di proiezione.

In caso di pseudo-prospettive o pseudo-assonometrie, viene adottato un metodo manuale consistente nella referenziazione manuale dell'immagine con il supporto di elementi esistenti. Ovviamente, per questo tipo di disegni, non è possibile raggiungere una corretta corrispondenza tra la fonte bidimensionale e lo spazio tridimensionale (Stefani, et al., 2013).

8 La piattaforma è stata resa disponibile sia online che in situ. In situ, consente un approccio innovativo nel caso di workshop educativi. Online, i visitatori possono ampliare la loro visita ricreando il loro percorso grazie alle loro stesse foto ed arricchendolo con informazioni derivate dal database.

9 Il software utilizzato per il processamento dei fotogrammi e l'elaborazione della nuvola di punti è un applicativo open source progettato dallo stesso gruppo di ricerca, noto come APERO MicMac. Il programma contiene un modulo per l'estrazione di punti omologhi tra i fotogrammi, attraverso l'algoritmo SIFT, per la stima dei parametri interni ed esterni del modello geometrico della fotocamera, per il calcolo della soluzione iniziale e l'operazione di bundle adjustment per la regolazione dell'orientamento relativo ed assoluto. Dall'estrazione dei punti corrispondenti, dopo la generazione di mappe di profondità sulle immagini più rilevanti, viene elaborata una nuvola puntiforme, fitta e

metricamente accurata.

10 <http://www.map.cnrs.fr/ldl/recherche/anr---monumentum.html>

11 P. Bromblet, J. M. Vallet, e V. Verges-Belmin, Illustrated glossary on stone deterioration patterns. Monuments and sites, 2008.

12 In particolare, CIDOC-CRMSci, una estensione del CIDOC-CRM destinata ad essere utilizzata come uno schema globale per l'integrazione di metadati sull'osservazione scientifica, sulle misurazioni e sui dati elaborati in scienze descrittive e empiriche come biodiversità, geologia, geografia, archeologia, conservazione del patrimonio culturale. <http://www.cidoc-crm.org/crmsci/>

13 <https://protege.stanford.edu/>

14 M. Pérouse de Montclos, Architecture: méthode et vocabulaire, Monum, éditions du patrimoine, 2004.

15 <http://www.aioli.cloud/>

16 È utilizzato l'applicativo APERO MicMac per la pipeline di trattamento fotogrammetrico ovvero la estrazione dalle fotografie dei dati per la ricostruzione del modello tridimensionale.

17 Una delle attuali maggiori applicazioni della piattaforma rientra nell'ambito del restauro e conservazione laddove i ricercatori di questo settore hanno maggior confidenza con l'annotazione di immagini piuttosto che con l'associazione di attributi attuata manipolando modelli tridimensionali.

18 Il termine è stato introdotto per la prima volta da Denard nel 2012 per indicare una categoria di dati più complessa e superiore ai metadati. Vengono così definiti “elementi che includono la relazione tra la metodologia o l'evidenza adoperata per interpretare un manufatto e il contesto nel quale il modello viene realizzato e manipolato per ulteriori indagini e ricostruzioni”. Denard, H., “A New Introduction to the London Charte”, Bentkowska-Kafel, A., Baker, D. e Denard, H. (Eds.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Digital Research in the Arts and Humanities Series, 2012, Ashgate, pp. 57-71.

19 Eastman, C., “An Outline of the Building Description System”, Research report. Institute of Physical Planning, 1974, 50, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.

20 Come affermato da Jerry Laiserin sul suo sito web, raggiungibile all'indirizzo <http://www.laiserin.com/about/index.php>. Laiserin è ritenuto uno dei blogger più autorevoli nella diffusione di notizie pertinenti tematiche di Building Information Modeling.

21 Questa modificabilità variazionale degli oggetti, viene definita da Autodesk “specificità ritardata”, ad intendere proprio la possibilità di cambiare i caratteri di un componente in seguito al suo tracciamento in una forma differenziale.

22 Ad oggi, esistono diversi software di natura BIM presenti sul mercato. Il più diffuso per la progettazione e modellazione parametrica è senza dubbio Autodesk Revit. A questo

si accompagnano, Allplan dell'azienda tedesca Nemetschek che ha acquisito Graphisoft assicurandosi anche ArchiCAD; GenerativeComponents nel pacchetto MicroStation della statunitense Bentley Systems Inc.; Digital Project, complesso sistema CAD derivato da Catia V5 di Dassault Systemes e sviluppato da Gehry Technologies, azienda startup di programmazione scaturita dall'imprenditorialità dell'architetto americano Frank Owen Gehry; Rhinoceros di McNeel con il plugin Grasshopper, un'estensione installabile che permette di impostare algoritmi generativi in maniera visuale e generare trame architettoniche fluide e complesse.

23 In Autodesk Revit, il perfezionamento di nuovi oggetti intelligenti è reso più agevole attraverso l'uso di modelli, forniti di base con il programma in modo da semplificare il lavoro degli utenti. Revit distribuisce i modelli di lavoro su tre tipi differenti di famiglie:

- le famiglie di sistema;
- le famiglie in place, ovvero "locali";
- i componenti standard.

Le prime sono predefinite all'interno di Revit e rappresentano gli elementi base di un edificio (le pareti, le porte, le finestre, i coperti e i pavimenti nelle loro varianti più generali). A partire da queste gli utenti possono personalizzare le proprie versioni modificandone le proprietà.

Le famiglie in place, o locali, sono invece generate specificatamente per un singolo progetto.

I componenti standard invece sono le più comuni famiglie e possono essere inseriti all'interno dei modelli di progetto.

Quando si inizia la costruzione di una famiglia personalizzata, si parte con il tracciamento di linee e piani di riferimento dell'elemento base, dal momento che il successivo disegno di dettaglio può prevedere la sua associazione a tali linee e piani, mediante l'attribuzione di una etichetta - label - che di fatto sarà il parametro che governerà quella dimensione all'interno dell'oggetto.

24 <https://www.w3.org/wiki/SweoIG/TaskForces/CommunityProjects/LinkingOpenData>

25 Gli studi a cui si fa riferimento sono attualmente in corso e vedono la presenza di una compagine di ricercatori del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Il dibattito è ancora in itinere. Si ringrazia la prof.ssa Mara Capone e la dott.ssa Emanuela Lanzara per aver fornito prime informazioni sulle discussioni in atto.

26 Letture interessanti sono: Carletta, J., "Assessing agreement on classification tasks: the kappa statistic", Computational Linguistics, 22(2), 1996. pp. 249-254; McKeown, G., Valstar, M. F., Cowie, R., e Pantic, M., "The SEMAINE corpus of emotionally coloured character interactions", IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME 2010. pp.1079-1084.

27 Esiste una ricca bibliografia in merito alla stima dell'accordo tra osservatori multipli. In questa sede ci si limita a indicare che le due maggiormente utilizzate sono: la PA (Percentuale di Agreement) e la Statistica Kappa. Quest'ultima, ideata per il caso di due valutatori, fu poi riveduta per introdurre la possibilità di associare dei pesi alle scelte e infine sviluppata per la generalizzazione al caso di più osservatori. Ha di fatto sostituito la PA fornendo una stima più accurata in quanto prende in considerazione l'eventualità che una parte dell'accordo tra i valutatori può derivare anche da scelte casuali. Una lettura semplificata per comprendere gli approcci maggiormente utilizzati per la stima

dell'accordo tra valutatori, può essere <http://www.di.unipi.it/~cappelli/seminari/bartolomei.pdf>.

28 Diverse iniziative sono nate a livello globale allo scopo di sviluppare le potenzialità dei videogiochi nel campo culturale, ancora inesprese o sottovalutate. In Italia, su scala nazionale, è stato lanciato nel 2017 l'Italian Videogame Program IVIPRO, "un progetto trasversale in comunicazione con le realtà che operano sul territorio. L'obiettivo è valorizzare il materiale già prodotto, la mappatura preesistente, e valutarne il potenziale videoludico; allo stesso tempo, arricchire la mappatura del territorio con dati inediti e maggiormente adatti ai mondi virtuali: architetture interessanti e video-ludicamente scenografiche, situazioni urbanistiche ottimali per mondi open world, città e luoghi particolarmente evocativi per il target di riferimento". <http://ivipro.it/it/home/>

PARTE SECONDA

**Questioni teoriche e metodologiche implicate nel processo di annotazione semantica
di modelli architettonici**

CAPITOLO TERZO

La semantica e l’architettura:
temi, formalismi e modelli

3.1 Fondamenti teorici per una lettura semantica
dell’architettura

Trattare di annotazione semantica nel dominio architettonico impone come premessa all’argomento, di esaminare il rapporto tra la disciplina della Semantica e l’Architettura, chiarendo la differenza terminologica tra Semantica, Linguistica e Semiologia.

Dall’enciclopedia italiana Treccani, si apprende che la **semiologia** è:

“in linea generale la scienza o, meglio, la teoria dei segni, di qualunque tipo essi siano, verbale e non verbale.”¹

La voce, curata dal filosofo Emilio Garroni, palesa la coincidenza della semiologia con la **semiotica**, la cui nozione enciclopedica riporta:

“Scienza generale dei segni, della loro produzione, trasmissione e interpretazione, o dei modi in cui si comunica e si significa qualcosa, o si produce un oggetto comunque simbolico.”²

Garroni spiega che il nome della disciplina oscilla tra semiologia e semiotica, prevalentemente in relazione alla geografia di diffusione. Il termine *Sémiologie* è stato accolto a partire dall’area europeo-continentale, sotto la prevalente influenza di Ferdinand de Saussure, considerato il padre

della linguistica moderna; il termine semiotica, più antico, è invece diffuso soprattutto in area tedesca - *Semiotik* - e angloamericana - *Semiotics* -³.

È lo stesso de Saussure, nel suo *Corso di linguistica generale*, pubblicato postumo nel 1916, a spiegare che la **linguistica** è solo una parte della più ampia scienza dei segni, la semiologia. Se la semiologia è “*una scienza che studia la vita dei segni nel quadro della vita sociale*”, la linguistica che studia solo il linguaggio verbale non può che esserne una porzione. Secondo de Saussure, lo scopo primario della linguistica è studiare il linguaggio umano inteso come atto comunicativo che si manifesta nelle diverse lingue parlate dell’uomo. Alla linguistica, lo studioso svizzero, assegna il compito di descrivere il maggior numero possibile di lingue storico-naturali e famiglie di lingue sia nella loro funzionalità in un dato momento, sia nel loro divenire attraverso il tempo, mirando a comprenderne le strutture fondazionali.

Nel vocabolario Treccani, la linguistica è:

“Scienza che studia sistematicamente il linguaggio umano nella totalità delle sue manifestazioni, e quindi le lingue come istituti storici e sociali, la loro ripartizione, i loro reciproci rapporti, nonché la funzionalità delle singole lingue sotto differenti aspetti (fonetico, sintattico, lessicale, semantico), sia nella struttura con cui si presentano in un determinato momento della loro storia sia nella loro evoluzione attraverso il tempo”⁴.

La definizione, che riporta in maniera semplificata le posizioni del linguista de Saussure, chiarisce il rapporto di inclusione che intercorre tra linguistica e **semantica**. Il termine, coniato nel 1883 da Michel Bréal⁵, designa un

“Ramo della linguistica che si occupa dei fenomeni del linguaggio non dal punto di vista fonetico e morfologico, ma guardando al loro significato.”⁶

Si arriva, così, al nocciolo della questione. **Studiare il significato**. Studiare il rapporto tra le componenti dell’espressione verbale e la realtà extralinguistica. Avvicinare la semantica all’architettura vuol dire tentare di trasporre, con un’analisi critica di contesto, le questioni semiologiche alle forme architettoniche. Comprendere il significato delle parole che hanno valore nel dominio delle geometrie costruite.

De Saussure imposta le proprie teorie semiologiche su quattro dicotomie: a) **significante-significato** che costituisce il segno; b) *langue-parole*; c) i

piani sintagmatico-associativi; d) diacronia-sincronia.

Per lo svizzero, il segno verbale è la parola, entità primaria della semiologia, formata da un “concetto”, il significato, e un “suono”, il significante, che dà forma al segno e lo rende comunicabile. Il binomio significato-significante fu arricchito, pochi anni dopo, dal linguista e filosofo Charles Kay Ogden e dal critico letterario Ivor Armstrong Richards. La coppia di autori inglesi, nell’opera *The Meaning of Meaning: A Study of the Influence of Language upon Thought and of the Science of Symbolism* del 1923, ha fornito una rappresentazione geometrica del binomio, arricchendolo di un componente. Il triangolo semiotico reca ai propri vertici i termini *symbol*, *thought* - oppure *reference* - e *referent*, cioè ‘simbolo’, ‘pensiero’ e ‘referente’. Il significato=thought è la nozione o immagine mentale generica che possediamo, ad esempio il concetto di colonna, e che ci permette di riconoscerla; il significante=symbol è la sua forma sonora o immagine uditiva, ad esempio la catena fonica /colonna/; il referente o denotato=referent è l’oggetto reale al di fuori della sfera linguistica. Questa rappresentazione geometrica evidenzia il rapporto diadico tra gli elementi, di modo che sussistono due relazioni dirette (tra pensiero e simbolo, da un lato, e tra pensiero e referente, dall’altro) e una relazione indiretta, quella tra simbolo e referente: il pensiero funge da mediatore tra le forme linguistiche e i referenti reali.

La dicotomia linguistica significato-significante appare molto presto nel mondo dell’architettura.

Vitruvio, nelle prime righe del suo trattato *De Architectura*, appena dopo la definizione dell’architettura, annota:

“cum in omnibus enim rebus, turn maxime etiam in architectura haec duo insunt, quod Significatur et quod Significat”.

Le traduzioni del testo non sempre sono così chiare per la comprensione di cosa Vitruvio intessere con tale espressione. Secondo la traduzione del marchese Bernardo Galiani⁷; “*il Significato è quella cosa che si propone a trattare: il Significante poi è la dimostrazione tratta dalle regole delle scienze. Onde è chiaro dover essere nell’uno e nell’altro esercitato colui che si dichiara Architetto*”. Il passo, come osservato anche da Renato De Fusco⁸, è piuttosto ostico; più plausibile invece la traduzione effettuata in età rinascimentale da Monsignor Daniel Barbaro⁹: “*specialmente nell’Architettura, queste due parti si trovano cioè la cosa significata, e quella che significa, la cosa significata, è l’opera proposta, della quale si parla. Quella che significa è la prova, e il perché di quella, con maestrevole ragione di dottrina espresso, e dichiarato*”. Il binomio vitruviano, interpretato in questi

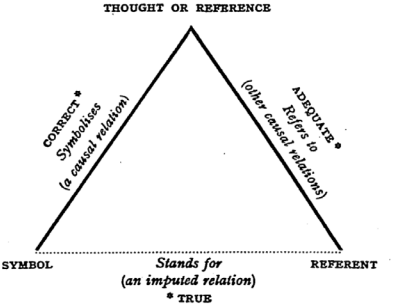


Fig. 3.1.1. Il triangolo semiotico.

termini, è sicuramente più vicino a quanto oggi intendiamo con esso. Tuttavia, la critica è piuttosto concorde nel ritenere che il trattatista romano abbia in realtà riportato, fraintendendone il senso originario, la coppia greca *semainon* e *semainómenon*, già presente nel *Cratilo* platonico e che sarà sviluppato dai sofisti del V sec. Nel *Cratilo*, Platone aveva impostato il problema del linguaggio discutendo del fatto se i nomi si adeguino o meno agli oggetti di cui dovrebbero essere imitazione (se siano *φύσει* o *νομω*)¹⁰. La traduzione del passo del trattato lascia pensare che Vitruvio, pur conoscendo la formula stessa e adottandola anche altrove, non ne abbia ben capito il senso filosofico e linguistico discutendo di ‘significato’ come ‘edificio di cui si parla’ e di ‘significante’ come ‘dimostrazione scientifica che ne spiega o significa l'essenza’.

La dicotomia significato-significante in architettura sarà, molti anni dopo, oggetto di un approfondita analisi da parte di molteplici studiosi, animati dalla volontà di sviscerare la dimensione semantica, linguistica, semiotica della disciplina delle costruzioni.

In ambito nazionale, Renato De Fusco ha fornito, con i suoi scritti, riflessioni estremamente potenti che hanno plasmato generazioni di architetti. L'autore ha trasferito le quattro dicotomie saussuriane al dominio dell'architettura, in uno sforzo intellettuale teso ad indagare il segno architettonico nella sua dimensione semiotica, senza trasferire pedissequamente le teorizzazioni linguistiche ma tendendo in debito conto la secolare tradizione teorica dell'architettura.

In riferimento a significato-significante, per De Fusco, la ‘parola’ è il segno architettonico, unità dialettica di un ‘significato’, l'invaso abitabile, e di un ‘significante’, l'involucro che lo delimita. Rifacendosi al binomio tettonico, lo storico napoletano ravvisa nell' involucro la componente materiale del segno - il significante -, mentre l'invaso costituisce la ragion d'essere funzionale di ogni ambiente architettonico, quindi qualcosa più prossimo al “concetto” linguistico¹¹. L'invaso è uno spazio, naturale, che l'involucro, fatto di una serie di muri o altro, lo rende “interno”, lo delimita rendendo l'intero segno una entità funzionale e significativa. Il rapporto tra i due elementi è evidentemente dialettico: non c'è l'uno, senza l'altro. In assenza di un involucro, non ci sarebbe delimitazione di spazio, non ci sarebbe invasore ma un vuoto; basta spostare un muro dell'involucro per dilatare lo spazio interno e avere un diverso invasore.

Per il binomio langue-parole, se per de Saussure il primo termine indica la lingua che per convenzione parla una comunità e il secondo l'uso individuale che ciascun parlante fa della lingua per esprimere il proprio pensiero da comunicare agli altri, nel campo dell'architettura per De

Fusco, la langue diventa il codice, o meglio, il codice-stile, mentre l'atto di parole diventa il messaggio, l'opera, la fabbrica o ancora i segni nei quali quest'ultima si articola.

È lo stesso de Saussure a trasferire la dicotomia sintagmatico-associativa, dal fenomeno linguistico ad altri campi segnici, fornendo una esemplificazione architettonica dei concetti, adottata da De Fusco. In primo luogo, il rapporto sintagmatico si instaura in presenza, tra le parole che in una serie effettiva nel discorso, contraggono senso e relazione schierandosi una dopo l'altra, in una catena lineare. Quello associativo, al contrario, unisce i termini in assenza laddove le parole, fuori dal discorso, rimando a qualcosa sedimentato nella memoria. Allo stesso modo, colonna e architrave stanno con evidenza in un rapporto sintagmatico determinato dalla presenza reale degli elementi nello spazio, ma appena si focalizza che quella colonna è dorica, il rapporto è una associazione mentale con gli ordini ionico e corinzio.

La quarta coppia saussuriana diacronia-sincronia, si concentra sulla dimensione del tempo. Secondo il linguista ginevrino, la dimensione sincronica del linguaggio è preponderante essendo orientato a privilegiare una lettura delle strutture della lingua lungo l'asse della contemporaneità. Una trasposizione banale del tema, porterebbe ad individuare nel campo dell'architettura la diacronia nel tempo della sua storia e la sincronia in quello della sua progettazione e costruzione. Ma De Fusco, marca che il binomio non è da legarsi solo alla dimensione temporale ma va coniugato con la terza dicotomia. Per l'architettura, l'asse cronologico è sì una successione di date, nomi di architetti, edifici paradigmatici, ma ognuno di essi presenta anche una espansione, a livello associativo e mnemonico, con altre date, altri nomi, altre fabbriche. Analogamente, l'asse della contemporaneità è sì composto da una serie di opere costruite nello stesso periodo ma ogni sintagma stimola connessioni con un minimo di spessore cronologico.

Come anticipato, lo storico campano non è il solo ad avere affrontato il tema di una teoria semiologica-architettonica. Numerosi studi sono apparsi negli ultimi decenni in Italia e all'estero, basti pensare alle ricerche compiute presso la Scuola d'Architettura di Firenze da Gamberini, a quelle di Umberto Eco, di Guido Morpurgo-Tagliabue, di Gillo Dorfles in Italia, di Christian Norberg-Schulz in Norvegia, di Max Bense e Kurd Allsleben in Germania. Un esame completo della letteratura richiederebbe troppo tempo ma una lettura generale permette di comprendere come le diverse teorizzazioni abbiano articolato visioni non sempre convergenti sui valori semiotici dell'architettura. Uno fra tutti Gillo Dorfles, in uno scritto

apparso sulla rivista Op.cit.¹², fa presente di non volersi avvalere della distinzione di de Saussure tra langue e parole (a differenza di De Fusco) poiché per l’architettura, l’autore considera i due termini coincidenti. La motivazione risiede nella inderogabile funzione pratica, utilitaria, propria di una costruzione che, di per sé, ne limita le possibilità espressive, veicolandone il messaggio verso una utilizzazione comunitaria, di massa e non intimistica, privata.

Il dibattito letterario pone in luce la complessità di una lettura semantica dell’architettura che si connota per l’intreccio di componenti così diverse, pertinenti a sfere logiche di pensiero distinte e decriptate nella sua storia, anche trattatistica, da poter essere, **sì**, analizzate secondo gli schemi linguistici precisati, senza però tentare di trasferire *tout court* i modelli propri, esclusivamente, del linguaggio verbale.

3.2 Il vocabolario dell’architetto nell’evoluzione dei tempi

Le differenti teorizzazioni su una possibile lettura semantica dell’architettura e sui modelli di traduzione degli schemi della linguistica alle espressioni del costruito, se da un alto, denunciano la complessità della questione, dall’altro testimoniano i rapporti di significazione tra un’opera/ componente architettonico e la sua immagine linguistica. A partire da questo assunto, il processo di semantizzazione di un modello digitale di architettura involve, dal punto di vista teorico generale, l’esame delle connessioni tra la dimensione linguistica e quella architettonica; dal punto di vista applicativo, si deve interrogare, in prima istanza, su quali siano i termini di dominio specifico che consentono di denotare gli elementi d’architettura rappresentandone il concetto, l’astrazione, il contesto semantico.

La composizione del vocabolario dell’architetto trae indubbiamente le sue origini nell’opera dei trattatisti. Prima di affrontare la sua definizione progressiva nei secoli, è opportuno in questa sede fare chiarezza terminologica, specificando quale sia la differenza tra lessico e dizionario nonché le sfumature distintive delle nozioni di lemma, parola, termine e vocabolo. Il **lessico** è l’insieme di parole per mezzo delle quali i membri di una comunità linguistica comunicano tra loro, il suo studio scientifico è il campo della lessicologia. A differenza, tutte le parole che si trovano

in un autore, nella lingua di un parlante, in un testo, in un ambiente, in una scienza, sono chiamate il **vocabolario** di quell’autore, parlante, testo, ambiente ecc. Il **dizionario** poi raccoglie in modo ordinato i vocaboli di una lingua, sebbene non si possa mai dire che un dizionario comprendi tutto il lessico di una lingua. Esso rimane sempre incompleto a causa della creatività lessicale che è la sorgente dell’arricchimento del lessico di ogni lingua. Nella lessicologia si distingue tra ‘parola’, ‘lessema’, ‘lemma’ (voce) e ‘termine’. **Parole** (vocaboli) sono le parole che appaiono nelle frasi (cane, che, abbaia, non, morde). Per **lessemi** si intendono le unità di base del lessico (cane, che, abbaia, non, mordere). Dal punto di vista lessicografico (cioè la creazione dei dizionari), il lessema si identifica con il **lemma** (o voce), cioè quello di cui tratta ogni singola definizione di un dizionario. E infine **termine** si usa per una parola che è propria di una determinata disciplina, cioè serve a definire esattamente un significato ed a metterlo entro certi confini (colonna, bugna, lesena). In questa sede, si è fatto ricorso ai diversi termini utilizzandoli come sinonimi, per ragioni espositive¹³.

I trattati di architettura costituiscono le prime operazioni di enunciazione e ordinamento della conoscenza architettonica, del “saper costruire”. Le loro pagine enucleano, contestualmente, i vocaboli specifici - che identificano gli oggetti descrittivi di un sistema di conoscenza architettonica¹⁴ - nonché le regole compositive che conformano i tipi architettonici. In architettura, infatti, quando si parla di vocabolario ci si riferisce congiuntamente sia ai termini che afferiscono alla dimensione linguistica sia agli elementi architettonici che gli stessi denominano. Ancor più specificatamente, i differenti tipi di elementi architettonici, riconoscibili in uno specifico campo della composizione d’architettura, costituiscono di fatto il vocabolario di quel campo, così come un vocabolario ‘parlato’ è una raccolta di tipi di parole che si ritrovano in uno specifico corpus di frasi¹⁵. Per cui, il vocabolario dell’architettura classica include l’ordine dorico, l’arco a tutto sesto e il frontone triangolare, quello gotico involve l’arco a ogiva e i contrafforti, e così via.

La più importante fonte classica per l’architettura è, senza dubbio, il trattato *De architectura* di Vitruvio, scritto probabilmente prima del 27 a.C. e durante il primo secolo d.C. Marco Vitruvio Pollione, architetto romano che lavorò sotto il regno dell’imperatore Augusto, osservò il disegno e la geometria dell’architettura antica di Roma e della Grecia e documentò gli



Fig. 3.1.2. Evoluzione del lessico dell’architetto. Alcuni dei trattati di architettura.



Fig. 3.1.3. Evoluzione del lessico dell'architetto. Alcuni dei dizionari ed enciclopedie di architettura.

ordini della classicità, le proporzioni, i metodi di costruzione e i materiali adoperati. La sua opera affascinò diversi intellettuali del Rinascimento, epoca animata dalla introduzione di nuove e più scientifiche regole per l'interpretazione degli edifici romani e greci e anche dalla produzione di disegni e rilievi. Leon Battista Alberti pubblicò il suo trattato *De re aedificatoria* nel 1452. L'opera è un tentativo di interpretare il lavoro di Vitruvio, migliorandone il contenuto filosofico e intellettuale. La versione originale, però, era scritta in latino ma senza illustrazioni incluse.

Allo stesso tempo, Francesco di Giorgio Martini, pubblicò le sue interpretazioni di Vitruvio ma, a differenza dell'Alberti, arricchì le proprie riflessioni con illustrazioni rappresentative delle leggi della proporzione classica. Il suo *Trattato di architettura civile e militare* ampliò la sistematizzazione conoscitiva al settore delle fortificazioni e delle macchine da guerra. Elemento pionieristico fu l'uso di numerosissimi disegni, realizzati a chiarimento del testo, e che devono essere considerati come un'essenziale componente del suo pensiero e della sua ricerca, non semplici illustrazioni a una riflessione puramente testuale¹⁶.

Nel 1537 Sebastiano Serlio pubblicò *Regole generali d'architettura*, primo dei sette libri di cui consta il suo trattato *I sette Libri dell'architettura*, i cui singoli volumi furono pubblicati in ordine irregolare. Qualche decennio dopo, nel 1562, Jacopo Barozzi da Vignola pubblicò la sua *Regola Delli Cinque Ordini d'architettura*, ricca di illustrazioni e scarnissima di testo, fornendo di fatto un aiuto più pratico per la comprensione e ri-composizione della classicità. Anche nel lavoro di Andrea Palladio del 1570 i *Quattro libri dell'Architettura* è documentato un breve resoconto delle regole dell'architettura classica. Il suo trattato si distingue per la serie di progetti architettonici personali, completi (piante, prospetti, sezioni) di diverse tipologie edilizie (palazzi e ville signorili) e influenzò notevolmente l'architettura in Europa e in seguito in America settentrionale.

I vocabolari e le regole fornite dagli architetti del Rinascimento furono documentati in modo più completo nei libri dedicati alla progettazione vernacolare, specifici delle regioni europee e coloniali del XVII e XVIII secolo. Codesti volumi sigillano le tecniche di costruzione storiche di respiro locale, spiegano i principi di geometria per la progettazione della struttura esterna e interna, le logiche per il posizionamento delle aperture, la relazione proporzionale degli elementi dell'edificio e i modelli per la realizzazione di dettagli classici¹⁷.

Il vocabolario dell'architetto, andatosi così progressivamente determinando e dettagliando, a partire dalla produzione trattatistica, vide la sua conclusiva definizione con l'*Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné*

des sciences, des arts et des métiers di Denis Diderot e Jean-Baptiste Le Rond d'Alembert, del XVIII secolo. Da questo momento in poi diversi teorici hanno suggerito l'esistenza di un vocabolario architettonico universale. Julien Guadet, autore di *Elements et théories d'architecture* del 1894, dichiarò che la sua lista e descrizione di elementi compositivi e costruttivi esisteva indipendentemente da singoli architetti, culture o zone climatiche. Thiis-Evensen nel 1988 ha argomentato che la creatività è primariamente legata al modo in cui determinate forme primitive sono combinate e variate, costituendo un linguaggio comune che può essere immediatamente compreso, riconosciuto, a livello individuale e collettivo.

Nascono così diversi dizionari di architettura (Pevsner, et al.; Portoghesi; Olmo, ecc.) la cui produzione si fonda sulla consapevolezza che l'uso di vocabolari, in cui i diversi tipi di elementi architettonici sono nominati e specificati, è indispensabile nella concettualizzazione e descrizione di una fabbrica di architettura.

3.3 Modelli di conoscenza per l'integrazione delle informazioni: tassonomie, tesauri e ontologie nel web semantico

La codificazione dei termini propri del dominio di architettura risponde alla necessità di strutturare un vocabolario condiviso in cui ad ogni elemento architettonico è assegnato un nome, una identità e la sua caratterizzazione. Una volta formalizzato il lessico dell'architettura, occorre definire le relazioni che intercorrono tra i lemmi e che qualificano un sistema costruito, nel trasferimento tra la dimensione linguistica e la dimensione spaziale.

Una specificazione necessaria da fare per la comprensione di ciò che segue è che le relazioni di cui si discute investono chiaramente i concetti, di cui i termini sono rappresentazione lessicale, e non i termini stessi. Per le logiche ed economia di produzione scritta, si è utilizzato sia “concetti” che “termini” per riferirsi ai poli delle relazioni, tenendo ben a mente la specificazione di cui sopra.

Vocaboli e rapporti relazionali di un qualsiasi dominio di conoscenza sono contenuti, ordinati e progressivamente dettagliati, all'interno di tre modelli conoscitivi:

- Tassonomia;
- Thesaurus;

- Ontologia.

3.3.1 Tassonomia

La tassonomia rappresenta il livello di vocabolario controllato¹⁸ più elementare. Si tratta di una serie di parole ordinate gerarchicamente, dalla più generale alla più particolare.

Un esempio di tassonomia può essere la classificazione introdotta da Linneo, per genere e per specie, degli esseri viventi.

Regno	> Animali
Phylum	>> Cordati
Classe	>>> Mammiferi
Ordine	>>>> Carnivori
Famiglia	>>>>> Canidi
Genere	>>>>>> Canis
Specie	>>>>>>> Canis Lupus

Nel livello tassonomico, quindi, sono contenuti i termini e le sole connessioni di tipo gerarchico che si instaurano tra gli stessi.

La relazione gerarchica è la relazione di base che distingue tipicamente una tassonomia da una semplice lista di termini non strutturati, rivelandone l'attitudine classificatoria. La relazione gerarchica esprime il concetto ed il grado di subordinazione o sovraordinazione fra termini appartenenti allo stesso albero gerarchico, dividendo le informazioni in categorie e sottocategorie, dai concetti più ampi a quelli più specifici. In questo albero, il termine sovraordinato o termine generico rappresenta una classe o un tutto, e il termine subordinato o termine specifico rappresenta un suo elemento o parte. È evidente che la relazione gerarchica può intercorrere solo fra termini che fanno riferimento a concetti appartenenti alla stessa classe di nozioni.

La sigla che per un termine individua i suoi sovraordinati è BT - *Broader Term*, alla quale può utilmente essere aggiunta una cifra indicante la distanza in “gradini” gerarchici fra i due termini legati dal rapporto. Per esempio,

Geometria iperbolica

-> BT1 Geometria non euclidea

->>BT2 Geometria

->>>BT3 Matematica

I subordinati del termine dato sono parimenti identificati da una sigla, NT *Narrower Term*. Pertanto, la rappresentazione del rapporto inverso dell'esempio precedente sarà:

Geometria

-> NT1 Geometria euclidea

->NT1 Geometria non euclidea

->>NT2 Geometria iperbolica

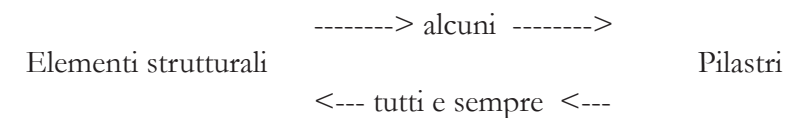
->>NT2 Geometria ellittica

I concetti che non sottendono termini generici sono chiamati *TT Top Terms* cioè termini di testa o termini apicali perché si trovano al vertice di una catena di relazioni gerarchiche.

La categoria delle relazioni gerarchiche si articola in tre sottospecie di connessioni:

- (i) la relazione generica o relazione genere/specie
- (ii) la relazione esemplificativa o classe/istanza o tipo/esempio;
- (iii) la relazione partitiva o relazione parte/tutto.

(i) La relazione generica o relazione genere/specie è distinta dalle sigle BTG e NTG. Identifica il legame che intercorre fra una classe o categoria ed i suoi elementi, membri o specie. Per soddisfare questo tipo di relazione, i termini non solo devono appartenere alla stessa categoria, ma rispondere anche alla condizione “tutti e sempre” in senso ascendente, ovvero alla condizione “alcuni/tutti” nei due sensi discendente e ascendente. Un esempio per chiarire è il seguente:



Lo schema specifica che: alcuni elementi della classe “Elementi strutturali” sono dei “Pilastrì”, tutti i “Pilastrì” sono sempre, per definizione e indipendentemente dal contesto, degli “Elementi strutturali”.

(ii) La relazione esemplificativa o tipo/esempio identifica il legame che intercorre fra una classe o categoria generale di cose o avvenimenti, espressa da un nome comune, ed un suo individuo, rappresentato da un nome proprio, e costituente una “classe di uno”. La relazione esemplificativa

è sempre tra un BT di tipo classe e un NT di tipo individuo, mentre la relazione partitiva, come si dirà tra poco, è o tra due classi o tra due individui. Un esempio:

Certosa
-> NT1 Certosa di San Lorenzo

(iii) La relazione partitiva o parte/tutto è distinta dalle sigle BTP e NTP. Riguarda un numero limitato di situazioni nelle quali risulta verificata la seguente condizione: il nome di una parte indica il nome del corrispondente tutto, indipendentemente dal contesto. Il nome del tutto rappresenta il concetto generico e il nome della parte il termine o i termini specifici del concetto. In tal caso, i termini possono essere strutturati gerarchicamente come BTP (tutto) e NTP (parte). Conseguentemente, la relazione partitiva non è considerata dallo standard una relazione gerarchica universalmente valida. Sono solo quattro i casi che rispondono al requisito restrittivo dello standard in un contesto generale:

- sistemi e organi del corpo: sistema circolatorio
-> NTP1 Sistema vascolare
->> NTP2 Arterie
- luoghi geografici: Italia
-> NTP1 Campania
->> NTP2 Napoli
- discipline o aree di conoscenza: Scienze
-> NTP1 Chimica
->> NTP2 Elettrochimica
- strutture sociali gerarchizzate: Presidenza del Parlamento
-> NTP1 Presidente
-> NTP1 Questore

Tuttavia, è riconosciuta la possibilità di organizzare gerarchicamente anche altri tipi di termini solo in contesti particolarmente specializzati, in cui è la specializzazione del campo di azione a garantire che il nome del tutto sia univocamente implicato dal nome delle sue parti.

3.3.2 Thesaurus

Il thesaurus¹⁹ amplia la tassonomia laddove include altri tipi di relazioni tra i termini, oltre a quelle gerarchiche, nonché altre proprietà dei termini stessi. La definizione più recente e riconosciuta come standard a scala internazionale è contenuta nelle *Guidelines for the establishment and development of monolingual thesauri*. ISO (*International Organization for Standardization*), 2788/1986; tradotte in italiano nella UNI/ISO 2788: 1993 “Linee guida per la costruzione e lo sviluppo di thesauri monolingue”. Lo standard ISO definisce il tesauo come:

“vocabolario di un ‘linguaggio di indicizzazione’ controllato, organizzato in maniera formale, in maniera cioè da rendere esplicite le relazioni ‘a priori’ fra i concetti”.

La norma circoscrive innanzi tutto il tesauo alla sola parte lessicale del linguaggio - la semantica -, al quale è abbinato il corpus di norme - la sintassi - che regolano i rapporti sintagmatici tra gli elementi. La specificazione data dall’ indicizzazione chiarisce e pone l’accento sullo scopo del tesauo di archiviazione, collegamento e recupero di risorse in sistemi di documentazione e diffusione della conoscenza. Questo vocabolario è, in primo luogo, alfabetico in quanto adopera termini nonché controllato. Il concetto di controllo si traduce in un requisito fondamentale enucleato nella relazione biunivoca fra termine e concetto, fra significante e significato: ciò significa che in un tesauo un termine esprime sempre uno ed un solo concetto, e che un concetto è sempre espresso da uno ed un solo termine. Poiché questa condizione è tutt’altro che vera nel linguaggio naturale, affetto da ridondanze, ambiguità, polisemie, omonimie, omografie ed altre disfunzioni che ne garantiscono ricchezza ed espressività, il raggiungimento del controllo, cioè dell’univocità semantica, nella costruzione di un thesaurus comporta due tipi di accorgimenti. Il primo interessa la raccolta e la collazione dei sinonimi, dei quasi sinonimi (cioè termini non sinonimi in senso proprio, ma considerabili tali ai fini della rappresentazione dei concetti dell’ambito coperto dal thesaurus) e degli antonimi (cioè degli opposti, o meglio dei termini collocati in diversi punti dello stesso continuum semantico) atti a descrivere il medesimo concetto. Tra questi, è scelto un solo termine che diventa nel vocabolario “termine preferito TP” (o PT *preferred term*), descrittore, cioè termine abilitato a descrivere quel determinato concetto; tutti gli altri termini, “termini non preferiti NPT”, non descrittori, che non possono essere assegnati al concetto per esprimerne il suo contenuto,

possono però vantaggiosamente entrare nel vocabolario controllato come punti di accesso che rinviano al termine preferito. Il secondo accorgimento riguarda la riduzione del contenuto semantico del termine preferito ad un solo significato, di solito il più tipico nell'ambito disciplinare del tesoro, per cui ad esempio in un thesaurus di architettura il termine luce esprimerà il concetto corrispondente alla “distanza tra due piedritti consecutivi di un arco, di un ponte, di un portico” e non alla “radiazione elettromagnetica percepibile dall'occhio umano, la cui lunghezza d'onda è compresa tra 0,77 e 0,39 micron”, né alla “apertura per lo scarico di materiali specialmente di rifiuto”²⁰.

La definizione dello standard ISO 2788 pone, inoltre, in rilievo i due elementi strutturali fondamentali del thesaurus. Le relazioni da esso esplicitate sono formalizzate; questo significa che ogni termine è inserito in una rete relazionale esplicita che ne chiarisce ulteriormente il contenuto semantico, e che mostra la distanza semantica fra i termini stessi. Le relazioni trattate sono a priori, cioè sono relazioni che pertengono all'ambito semantico, del significato, dei termini, e pertanto sono sempre valide in qualsiasi contesto.

Le relazioni tesaurali sono:

- relazioni gerarchiche;
- relazioni associative;
- relazioni di equivalenza.

La struttura relazionale consente al tesoro di diventare una sorta di “mappa” dei significati espressi da un certo linguaggio, di scandirne la rete semantica percorrendo relazioni e strutture classificatorie.

Della relazione gerarchica si è già detto nell'ambito della tassonomia che la ricomprende già nella propria struttura.

La relazione di equivalenza o preferenziale o sinonimica è, di fatto, la prima fondamentale relazione semantica di un tesoro che si instaura tra le due categorie di fondamentali in cui sono differenziati i suoi componenti lessicali, TP e TNP. La relazione preferenziale è quella deputata a rapportare uno o più termini non preferiti ad un termine preferito che esprime lo stesso concetto o un concetto molto simile, che sarà rappresentato sempre univocamente dal TP. Il gruppo di termini che si assume rappresentino lo stesso concetto, che si considerano, ai fini dell'indicizzazione, equivalenti, e fra i quali viene scelto il termine preferito, si definisce “gruppo di equivalenza”.

Le relazioni tesauriche sinonimiche vengono esplicitate e rappresentate

dalle sigle USE e UF. La prima indica il rinvio da un termine non accettato ad uno accettato ossia dal TNP al TP mentre la seconda definisce il rapporto reciproco, il riferimento da un termine accettato a uno non accettato cioè la segnalazione dei TNP nel corredo semantico del TP. Per chiarire:

Arco acuto
-> UF arco moresco
-> UF arco ogivale

Arco ogivale
-> USE arco acuto

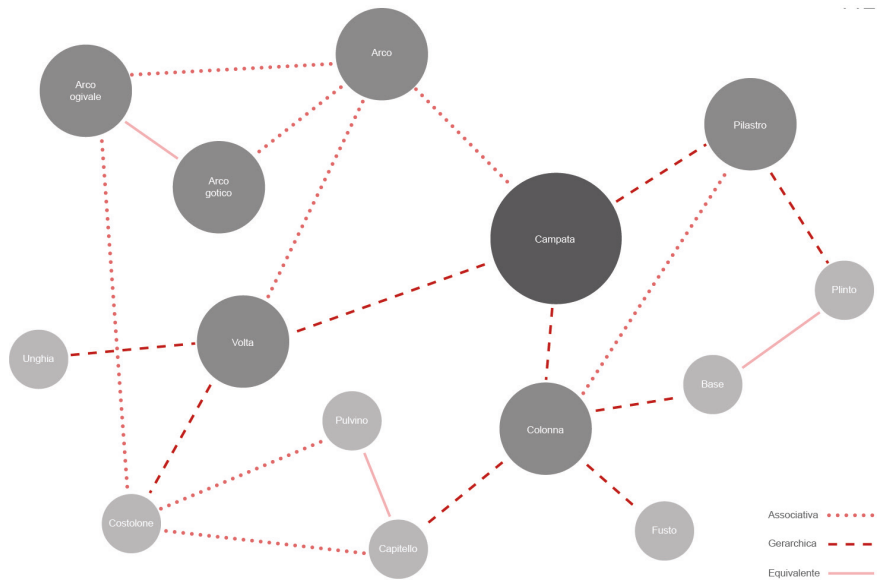
È ora chiaro che la relazione di equivalenza è l'unica relazione thesaurica che mette in rapporto tra di loro l'insieme dei termini preferiti e quello dei termini non preferiti: tutte le altre relazioni, gerarchiche e associative, sono con evidenza relazioni fra termini preferiti.

L'ultima delle relazioni tesauriche classiche è la relazione associativa o residuale. Il nome deriva dal fatto che si tratta di una tipologia che si illustra più facilmente analizzandone le caratteristiche negative che non definendola in positivo. La relazione residuale è in grado di collegare coppie di termini che non rientrano né nella casistica della relazione sinonimica (non fanno parte dello stesso insieme di equivalenza), né in quella della relazione gerarchica (non appartengono alla stessa catena gerarchica), ma sono tuttavia così fortemente associati da rendere necessario esplicitarne il legame all'interno del tesoro. La relazione associativa è reciproca, e viene indicata in ambedue i casi con la sigla RT - *Related Term*. La regola generale affinché sia valida la relazione è che uno dei due termini deve essere fortemente implicato dall'altro, uno è necessario alla spiegazione o definizione dell'altro. I termini legati da relazioni associative possono appartenere alla stessa categoria o a categorie diverse. Alcuni esempi:

Affresco
-> RT1 arriccio
-> RT1 intonaco
-> RT1 sinopia

Certosa
-> RT1 monaco certosino

Fig. 3.1.4. Esempio delle relazioni tesauriche in ambito architettonico.



Fra termini appartenenti a categorie diverse e rispondenti al requisito dell'implicazione dell'uno dall'altro, si configurano diverse tipologie di rapporti che possono motivare una relazione associativa:

- (i) una disciplina e il suo oggetto di studio (zoologia e animali);
- (ii) una attività e il suo agente (cinema e attore);
- (iii) una azione e il suo prodotto (panificazione e pane);
- (iv) una azione e chi o cosa la subisce (processo e imputati);
- (v) oggetti e fenomeni e loro proprietà (pomodoro e rosso);
- (vi) concetti e loro origini (Italiani e Italia);
- (vii) concetti legati da rapporti causali (terremoto e terremotati);
- (viii) una cosa e il suo antidoto (piante ed erbicidi);
- (ix) un concetto e la sua unità di misura (temperatura e gradi);
- (x) locuzioni sincategorematiche (cioè termini composti) e loro nomi sotto categoriali (piante fossili e piante).

3.3.3 Ontologia e Web Semantico

L'**ontologia** esprime il grado di complessità maggiore in quanto contiene relazioni più complicate e una logica inferenziale inerente al modello di rappresentazione del dominio. Espressa con appositi linguaggi formali, l'ontologia include oltre a relazioni e proprietà, anche assiomi e restrizioni. Pertanto, tassonomie e tesauri possono esprimere le relazioni che intercorrono tra i termini di un vocabolario controllato, ma non possono

fornire regole grammaticali per usarlo, compito assolto da una ontologia rispetto a un determinato dominio di conoscenza.
Mutuato dal campo filosofico, in cui è definito come lo “studio dell’essere come essere”²¹, il concetto di ontologia si caratterizza nel campo delle scienze informatiche e *knowledge-based engineering* come:

“descrizione esplicita e formale di una concettualizzazione condivisa”²²

Questa definizione mostra e collega un numero elevato di concetti specifici: descrizione inquadra l'ontologia come una forma di rappresentazione della conoscenza. Esplicita si riferisce ai concetti e ai vincoli che devono essere chiaramente definiti in elenchi estensionali, in relazione al campo di conoscenza. Un'ontologia è formale perché è simbolica, comprensibile e leggibile, da umani e da computer, consentendo in particolare alle macchine di produrre alcuni ragionamenti tra concetti grazie a regole definite. Concettualizzazione indica che un gruppo distintivo di esperti dello stesso dominio vuole descrivere e modellare un fenomeno astratto esistente nel mondo. Il dominio, quindi, identifica un determinato sottoinsieme dello scibile, affrontato da un certo punto di vista. Infine, la descrizione è condivisa, nel senso che raccoglie conoscenze consensuali concordate da un gruppo di esperti della comunità scientifica. Pertanto, si può concludere asserendo che un'ontologia di dominio è una formalizzazione della conoscenza condivisa dedicata a un campo specifico.

In virtù dei caratteri riconosciutigli dalla sua definizione, l'ontologia è un modello concettuale di una particolare area di conoscenza di cui rappresenta le entità, descrive le parole comuni e i concetti/significati, include le relazioni che intercorrono tra questi, espresse sotto forma di attributi/proprietà e dei valori che questi attributi possono avere. Quindi una ontologia è costituita da:

- classi (concetti generali del dominio di interesse);
- relazioni tra le classi;
- proprietà (attributi, slot, ruoli, assegnati a ciascun concetto per descriverne vari tipi di caratteristiche);
- restrizioni sulle proprietà (impongono il tipo di dato sul valore che la proprietà può assumere);
- istanze (rappresentazione di specifici oggetti del mondo reale, inquadrate all'interno delle classi di cui ereditano attributi e relazioni).

La semplificazione su esposta, può essere espressa in maniera più formale, in termini matematici, con i quali una ontologia è definita come una quintupla:

$$O = \{C, R, Hc, Z, I\}^{23} \quad (3.10)$$

dove:

C, è specificamente l'insieme di concetti;

R, corrisponde all'insieme di relazioni che li descrivono;

Hc, identifica la gerarchia di concetti ossia la tassonomia che è definita da un insieme di concetti connessi da relazioni di sussunzione;

Z, è l'insieme di assiomi - verità indimostrabili accettate - dell'ontologia, che sono esplicitati concretamente da vincoli e restrizioni tra due concetti, che sono le specifiche delle relazioni (R);

I, è l'insieme di istanze o individui di ontologia O.

Appare ora chiaro come i tesauri e le ontologie siano gli strumenti fondamentali per raggiungere l'interoperabilità semantica, poiché concettualizzano un dominio e agiscono come mediatori per la ricerca integrata delle risorse (ad esempio, oggetti tridimensionali digitali) gestite in diversi repositories. La formalizzazione consente, difatti, sia la comunicazione tra gli esperti del settore che la comunicazione tra le macchine e la conversazione tra l'utente e la macchina.

Per comprendere appieno il ruolo che l'ontologia svolge nella integrazione, condivisione e fruizione del patrimonio digitale, è utile illustrare sinteticamente lo sfondo nel quale la stessa attua il proprio supporto: il **web semantico**.

Come suggerisce il nome, il web semantico si origina come trasformazione del *World Wide Web* in un ambiente che si serve della semantica per specificare il contesto dei documenti pubblicati, enucleato nei corrispondenti metadati. Le risorse, generate dall'associazione ai documenti di informazioni e dati contestuali, sono prodotte in formati adatti all'interrogazione, all'interpretazione e all'elaborazione automatica da parte delle macchine. Padre del *Semantic Web* è Tim Berners-Lee, uno dei fondatori del *World Wide Web Consortium* W3C²⁴, che in una intervista per l'UNESCO così espresse la sua nuova visione:

“Ho un doppio sogno per il Web. Da un lato, lo vedo diventare un mezzo molto potente di cooperazione tra gli esseri umani. E in una seconda volta, mi piacerebbe che fossero i computer a collaborare. Le

macchine diventano capaci di analizzare

tutti i dati che circolano sulla rete: contenuti, collegamenti e transazioni tra persone e computer. Il Semantic Web cercherà informazioni in vari database, sia nei cataloghi online che nei siti meteorologici o azionari, e permetterà a tutte queste informazioni di essere elaborate dai computer. Ciò non è possibile allo stato attuale poiché i dati online non sono compatibili o formattati per analisi diretta da parte delle macchine. Le pagine Web sono solo per la lettura umana.

Il Web semantico soddisferà anche i desideri di tutti coloro che vorrebbero avere un solido motore di ricerca. Per ora, i motori di ricerca consegnano migliaia di pagine in risposta a una singola richiesta. Tuttavia, è impossibile studiare il contenuto di tutte queste pagine. Con il Semantic Web, il motore di ricerca risponderà: “Ecco un oggetto che posso matematicamente garantire che soddisfi il criterio desiderato”. In breve, i motori di ricerca diventeranno più affidabili e più efficienti. Quando il mio sogno sarà realizzato, il Web sarà un universo in cui la fantasia dell'essere umano e la logica della macchina possono coesistere per formare una miscela ideale e potente”²⁵

Il web semantico è una continuazione logica della manipolazione delle informazioni nel mondo della rete di dati. Data la grande quantità di risorse disponibile sul web, si è avvertita la necessità di trovare i mezzi per descriverle e collegarle più intimamente tramite tecnologie specifiche di annotazione e interpretazione semantica. Il W3C ha sviluppato e standardizzato, a partire dai primi anni del Duemila, una serie di strumenti orientati a strutturare in modo efficace le informazioni utilizzando la conoscenza. Grazie a tali strumenti, le risorse web di qualsiasi tipo possono essere descritte e annotate mediante l'uso e l'associazione di informazioni, strutturate e descrittive, sotto forma di metadati. In questo modo, le annotazioni, che descrivono le risorse, possono essere interpretate al fine di produrre un migliore sfruttamento²⁶. La velocità nel recupero delle informazioni ha reso le tecnologie per il web semantico estremamente popolari al punto che applicazioni come social network, blog, forum e persino l'e-learning le hanno sfruttate grazie alla descrizione dei contenuti che offrono, latrice di ulteriori analisi in termini di strutturazione e generazione dei risultati²⁷.

L'infrastruttura è articolata in diversi livelli, formati da più linguaggi, una vera e propria successione complessa di stratificazioni, tra le quali quelle intermedie rappresentano probabilmente le più complesse ed elaborate, sicuramente sono le più soggette a modifiche con l'implementazione del

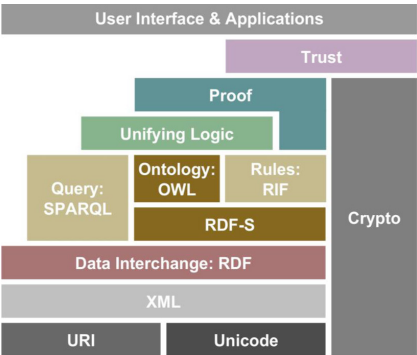


Fig. 3.1.5. I differenti livelli della struttura del web semantico.

web semantico stesso. Al momento gli strati possono essere suddivisi in tre principali raggruppamenti:

- (i) strato base;
- (ii) *core*;
- (iii) strato finale.

Ognuno livello è composto a sua volta da ulteriori strati che non sono da intendersi fissi e immutabili: la stratificazione può variare per assecondare la necessità di modificare la struttura del web o per la sua stessa evoluzione.

(i) Lo strato di base del web semantico è denominato URI/IRI. È il livello storico del web, presente ancor prima della sua evoluzione in rete semantica. L'URI *Uniform Resource Identifier* è un identificatore, generico, estensibile e universale di una risorsa descritta come unica nella rete. L'IRI *International Resources Identifier* è un derivato dell'URI abbastanza simile al progenitore. È sostanzialmente una versione internazionale della descrizione delle risorse per cui possono essere utilizzate lingue differenti per descrivere la stessa risorsa ma l'identificatore di base della stessa, non cambia. L'URI è sotto specificato in URL *Uniform Resource Locator* e URN *Uniform Resource Name*²⁸.

Il primo identifica una risorsa attraverso l'indicazione su come ottenerla/prelevarla dalla rete o in altri termini in base alla “posizione” della risorsa. Ad esempio,

<http://www.chrome.unina.it/>

è un URI che identifica una risorsa, la home page del sito del progetto CHROME, e lascia intendere che tale risorsa è raggiungibile via http tramite un host di rete chiamato `www.chrome.unina.it`.

Il secondo identifica una risorsa attraverso un nome. A differenza dell'URL, l'URN non contiene informazioni su come prelevarla dalla rete. L'obiettivo è quello di creare un identificatore per la risorsa che sia persistente e indipendente dalla posizione. Pertanto, se una risorsa identificata da un URL A, cambia posizione e diventa raggiungibile dall'URL B allora attraverso il suo URN sarà comunque raggiungibile anche se dall'URL A non lo sarà più. Ad esempio,
`isbn:0-395-36341-1`

è un URI che consente di individuare univocamente un libro mediante il suo nome nel dominio dei codici isbn, ma non suggerisce dove e come ottenere copia di tale libro.

(ii) Il core rappresenta la parte centrale della struttura del web semantico.

È costituito da una serie di linguaggi - che permettono la descrizione delle informazioni e, naturalmente, la strutturazione di dati e metadati - di cui un considerevole numero è usato per esprimere le ontologie. Se infatti il web semantico è nato con il solo intento di strutturare e descrivere i dati, ben presto ci si è resi conto che sfruttare le ontologie avrebbe comportato vantaggi per una strutturazione dei dati basata sulla conoscenza.

I linguaggi più noti sono: XML, RDF, SPARQL, RIF, OWL.

L'*eXtensible Markup Language* - XML è utilizzato da molto tempo e raccomandato dal W3C²⁹ per la modellizzazione di dati e l'attribuzione di significati in virtù della capacità di utilizzare tag specifici per strutturare documenti e dati. L'XML, tuttavia, non include una dimensione semantica per cui è uno strumento utile per definire la sintassi di base di un linguaggio di livello semantico più elevato.

Per questa finalità è stato realizzato l'*RDF Resource Description Framework*. È un modello di dati derivato dall'XML la cui capacità è di descrivere le risorse attraverso delle triplette del tipo soggetto - predicato - oggetto. Il soggetto è la risorsa da descrivere, il predicato è una proprietà che collega la risorsa all'oggetto e può essere espresso come URI o URL, l'oggetto è un valore quindi anche un semplice URI che punta a un'altra risorsa. In RDF, tutte queste risorse possono essere rappresentate in grafi³⁰.

La logica di base è che tutto ciò che può essere descritto, lo si può fare tramite triplette così strutturate: una pagina web, una persona, un documento, un luogo, un edificio.

L'interrogazione delle risorse strutturate secondo il modello RDF è possibile grazie al linguaggio SPARQL.

Il *Simple Protocol And RDF Query Language* è molto simile alla sintassi di SQL *Structure Query Language*, caratteristico dei modelli di dati relazionali³¹, ma permette di trovare inferenze tra i dati mediante la costruzione di queries che sfruttano la strutturazione delle informazioni in soggetti e relazioni descritti in triplette RDF. Nonostante la complessità delle relazioni delle basi di dati, SPARQL permette di interrogare le risorse senza conoscere le loro strutture, le quali consentono l'accesso ai dati senza mediazione e facendo inferenze su una base di regole³².

Le regole possono essere scritte in due lingue diverse: SWRL e RIF.

Il *Rule Interchange Format* - RIF è un elemento nuovo nella struttura del web semantico. Si tratta, infatti, di un format entrato ufficialmente in funzione nel 2010, basato maggiormente su XML, consentendo maggiore flessibilità in termini di scambio e utilizzo tra diversi formati di dati esistenti. Lo scopo principale del RIF è quello di migliorare l'integrazione di dati specifici, in maniera da migliorare complessivamente le interazioni con il Web. In particolare, il RIF dovrebbe utilizzare determinate informazioni derivanti

da precedenti ricerche e necessità dell'utente per garantire soluzioni quanto più vicine a quelle che realmente si stanno cercando.

Una estensione di RDF è il linguaggio OWL *Ontology Web Language*.

È un linguaggio per la rappresentazione di cose, gruppi di cose e relazioni tra di loro³³ ed ha la particolarità di essere basato sulla logica computazionale, *Description Logic*³⁴. In questo modo, la conoscenza espressa in OWL può essere sfruttata e compresa dagli agenti software.

(iii) Lo strato finale della struttura del web semantico è caratterizzato da livelli in continuo sviluppo, definiti *Unifying Logic*, *Proof* e *Trust*. È il raggruppamento più avanzato del web semantico poiché orientato ad incrementare lo sviluppo di una comunicazione collaborativa tra la rete semantica e l'Intelligenza Artificiale. In particolare, al livello Trust è affidato il compito di suddividere tutte le informazioni rilevate in base all'affidabilità ossia in base alla reale corrispondenza tra quanto digitato dall'utente e quanto trovato dalla macchina. Per assicurare una corretta validità delle risposte, il livello Proof effettua delle prove, in grado di stabilire l'affidabilità dei dati. Tali prove sono basate su deduzioni logiche, supportate dal livello Unifying Logic. Appare evidente come questi tre elementi del web semantico, per assicurare il pieno successo, dovranno fare uso di agenti intelligenti, in grado di supportare la ricerca e la fase di attendibilità della stessa³⁵.

Compreso più nel dettaglio cosa sia la rete semantica, è possibile aggiungere una ulteriore specificazione alla nozione di ontologia la quale è, quindi, “la base della rappresentazione formale della conoscenza nel web semantico”. Fin qui, ci si è riferiti alla ontologia come concettualizzazione di un dominio ossia di una area ristretta della conoscenza.

Esistono, in verità diverse tipologie di ontologia, quattro per la precisione, classificate in relazione al livello di espressività ed estensione verso il mondo della conoscenza³⁶:

- ontologia di alto livello o fondazionale o generica;
- ontologia applicativa;
- ontologia delle rappresentazioni;
- ontologia di dominio.

Le ontologie fondazionali³⁷ rappresentano concetti e proprietà molto generali, ai quali si possono collegare i termini specifici presenti nelle ontologie di livello inferiore, come quelle di dominio. Sono applicabili ad un vasto insieme di ambiti cognitivi³⁸ e possono derivare anche dalla

concatenazione di diverse ontologie di dominio esistenti³⁹. Tra le ontologie fondazionali si ricordano SUMO⁴⁰, DOLCE⁴¹ e CIDOC-CRM⁴².

L'ontologia delle applicazioni contiene e rappresenta le conoscenze di dominio necessarie per un'applicazione. Questo aspetto la rende di fatto un'ontologia dedicata, specifica e, nella maggior parte dei casi, non riutilizzabile.

L'ontologia delle rappresentazioni concettualizza le forme primitive dei linguaggi di rappresentazione della conoscenza, fornendo un modo per costruire assiomi e strutturare concetti, sotto concetti, proprietà utili per la produzione di ontologie di alto livello.

Le ontologie di dominio modellano la conoscenza di un particolare campo i cui termini distintivi, provenienti principalmente da vocabolari controllati, sono specificati in modo da non invadere un altro dominio.

L'obiettivo di ciascuna tipologia è evidentemente lo stesso, tranne che il dominio ne limiterà la scala del modello.

3.3.4 Osservazioni sui rapporti relazionali tra gli elementi architettonici

Nel presentare la sistematizzazione che un thesaurus fornisce per i concetti e le mutue relazioni nel campo generale della conoscenza (par. 3.3.2), è stata sottolineata l'applicabilità limitata, riconosciuta dallo standard, per le relazioni parte-tutto a solo quattro contesti. È stata anche evidenziata la possibilità che la stessa norma ISO prevede di estensione dei rapporti relazionali partitivi ad altri domini, purché estremamente specialistici. È questo il caso del dominio architettonico.

Se i termini che sostanziano il lessico dell'architetto sono rappresentazione di concetti la cui sostanza è tradotta in materia negli elementi di cui è composta una architettura, per associare le forme geometriche a concetti di descrizione semantica è necessario tenere in conto il complesso sistema di relazioni che organizza e dispone gli elementi formali in un insieme ordinato. Il manufatto architettonico è una unità sistemica complessa di conoscenza, in cui i singoli componenti sono interconnessi tra loro secondo molteplici livelli di relazioni. Tra queste, le più significative sono quelle partitive, cui è rivolto un discreto numero di scritti della letteratura internazionale sui rapporti relazionali fondativi di un sistema architettonico.

Jean-Pierre Goulette nel 1999, ha identificato tre tipi di relazioni tra gli

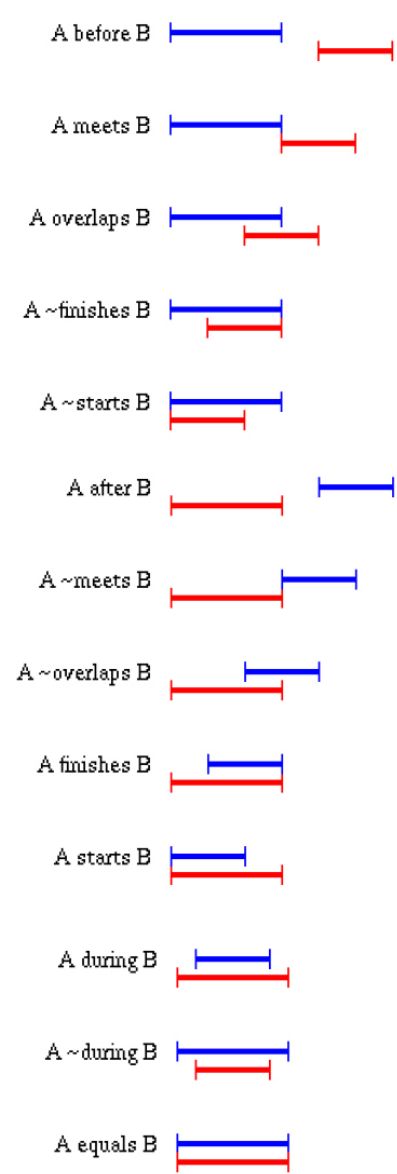


Fig. 3.1.6. Le relazioni topologiche di Allen.

elementi riscontrabili nel dominio dell'architettura:

- Relazioni topologiche;
- Relazioni parte/tutto;
- Relazioni compositive.

La prima categoria delle relazioni topologiche costituisce la forma di associazione più elementare.

La topologia da fondamento alle relazioni che il posizionamento relativo di un elemento, o parte di un elemento, instaura all'interno di un sistema unitario. Le relazioni topologiche sono quindi relazioni spaziali che trascurano la quantificazione di distanza e misura per governare le mutue giaciture nello spazio di componenti distintivi. In altre parole, la loro natura è di tipo qualitativo laddove descrivono “come” sono in relazione due elementi senza specificare “quanto” (misura); inoltre, sono completamente indipendenti dalla distanza tra i due valori considerati e dalla estensione degli stessi.

La definizione teorica delle relazioni topologiche fa riferimento a diversi modelli. Fra questi i più affermati, sono i modelli di Max Egenhofer e di James Frederick Allen, applicati già da molto tempo con robustezza per la codificazione dei rapporti spaziali in campo geografico e archeologico. Nella ricerca archeologica, Maurizio Cattani e Andrea Fiorini⁴³, nel 2004, hanno ampliato il ragionamento, specificando come sia possibile estrarre all'interno delle proprietà di relazione spaziale, oltre a quelle maggiormente considerate⁴⁴, anche categorie specifiche quali relazioni di intorno, di prossimità, di continuità, di connessione, di separazione, di chiusura, di successione. Tali categorie, sono applicabili parimenti all'architettura.

Alcuni esperimenti di osservazione comportamentale condotti all'inizio degli anni Duemila⁴⁵, hanno dimostrato che i concetti topologici “vicinanza a”, “contatto con”, “allineamento a”, “inclusione in”, “prossimità da”, “in successione”, suggeriti per descrivere le relazioni spaziali fra gli oggetti, possono essere applicati nel processo di “ammassamento” delle forme architettoniche. Ancora, Akin e Moustapha hanno assunto che il costruito possa essere letto in termini di confini (i perimetri strutturali di un edificio), regioni (lo spazio abitativo) e connessioni (gli elementi che permettono di varcare i confini e di passare da uno spazio ad un altro). Questi tre elementi fondamentali sono formalizzati come nodi e archi orientati di un grafo che trascrive le relazioni topologiche di adiacenza ed accessibilità tra gli ambienti di un edificio, raggruppati per zone funzionali. I dispositivi topologici, dunque, consentono nell'analisi dei manufatti architettonici, antichi o contemporanei, di estrarne i principi compositivi

nella distribuzione di spazi e percorsi⁴⁶.

Accanto ai principi ordinativi che trovano le proprie ragioni nella distribuzione spaziale, si collocano i rapporti parte/tutto.

Si tratta di legami che esprimono l'organizzazione che è possibile leggere nella composizione di un edificio sotto il profilo della gerarchia. L'origine di un manufatto può ricondursi al raggruppamento di singoli elementi in un complesso unitario oppure in gruppi, ordinati in una struttura a più livelli che procede in ordine di pesi discendente. Gli elementi costitutivi sono quindi le parti di un tutto omogeneo. Ad esempio, una colonna è un tutto che raggruppa una collezione di parti che può essere considerato sia come un elemento unitario in un raggruppamento di ordine superiore (per esempio, in un colonnato) che essere interpretata come una composizione di sotto elementi.

Questo tipo di relazioni può essere dettagliata mutuando dalla meronimia formale, le teorizzazioni sui rapporti meronimici.

Infine, le relazioni di composizione sono schemi di rappresentazione del complesso di regole che governa il posizionamento e dimensionamento relativo di un gruppo di elementi in un *layout* geometrico generale e unificante. Un esempio è la serliana, un particolare tipo di trifora composta da un arco a tutto sesto affiancato simmetricamente da due aperture sormontate da un architrave; fra l'arco e le due aperture sono collocate due colonne. La disposizione degli elementi architettonici “primari” - arco, architrave, colonna - definisce lo schema compositivo precipuo che definisce una serliana e la distingue come unità compositiva da altri tipi di trifore.

Partendo dalla varietà di relazioni che definiscono l'organizzazione complessa di una architettura, i rapporti topologici e compositivi sono riconducibili a problemi legati più specificamente alla progettazione contemporanea così come suggerisce Livio De Luca⁴⁷, per il quale il sistema di relazioni più significativo per lo studio del costruito storico è quello parte/tutto. L'assunto è pienamente condivisibile se si considera che un'architettura è una collezione di entità primarie incastonate in un contesto di ricorsione: un elemento generale che si scompone in sotto elementi che a loro volta sono scomponibili in altri elementi di livello inferiore e così via.

All'interno del sistema parte/tutto, è possibile distinguere tre tipi di sotto relazione, mutuati dalla meronimia formale⁴⁸ e applicabili agli elementi

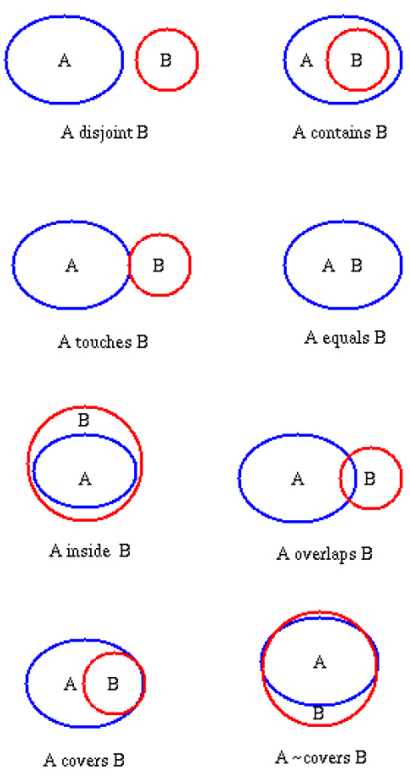


Fig. 3.1.7. Le relazioni topologiche di Egenhofer.

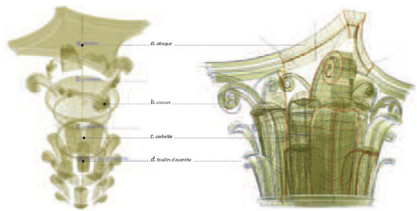


Fig. 3.1.8. Le relazioni singolo elemento/tutto in un capitello di ordine corinzio.

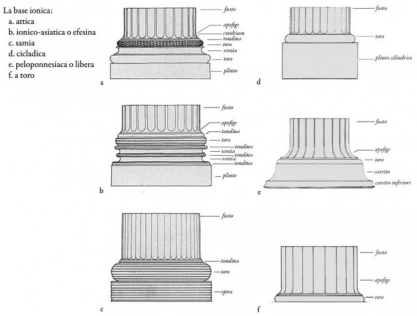


Fig. 3.1.9. Le relazioni pezzo/collezione in una classificazione di basi ioniche.

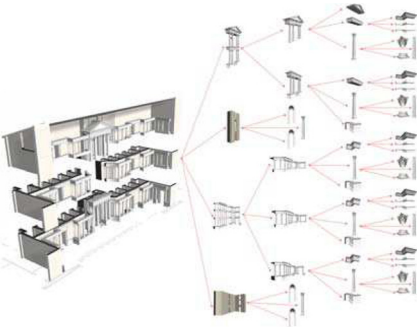


Fig. 3.2.0. Le relazioni componente/composizione in un modello teorico di teatro romano di epoca augustea.

architettonici⁴⁹:

- (i) Singolo elemento/Tutto;
- (ii) Pezzo/Collezione;
- (iii) Componente/Composizione.

(i) Il rapporto singolo elemento/tutto esprime il modo con cui le sotto parti di un oggetto sono organizzate in modo da dar forma a un singolo elemento. I trattati di architettura⁵⁰ forniscono normalmente un termine per ciascuna sotto parte dell'elemento. Questa distinzione corrisponde, in alcuni casi, a vere e proprie divisioni fisiche dell'oggetto esaminato, in altri, si riferisce a transizioni geometriche della forma. Un esempio è offerto dalle modanature e unità elementari che compongono un capitello di ordine corinzio: elice, fiorone, caulicolo, abaco e così via.

(ii) La relazione pezzo/collezione è alla base delle classificazioni tipologiche. Si tratta di rapporti in cui un singolo oggetto è raggruppato in una categoria sulla base di criteri di comparazione, in relazione all'identificazione di un tipo. In architettura, questa distinzione è basata evidentemente su correnti stilistiche legate a periodi storici o aree geografiche. Un esempio è offerto, all'interno del tipo della base di colonna in ambito ionico, dalle diverse varianti legate a specifici ambiti geografici e storici: base ionico-attica, base ionico-asiatica o efesina, base samia, base cicladica, base libera o peloponnesiaca, base a toro, base composita, base attica (per citare le principali)⁵¹.

(iii) La terza tipologia è quella del legame componente/composizione. È un collegamento presentato proprio nei trattati di architettura classica in cui si esprime l'accordo esistente tra le membrature e la composizione dell'intero manufatto. I principi perseguiti sono quelli delle proporzioni, del ritmo e della simmetria⁵². In riferimento a questo tipo di relazioni, Goulette ne evidenzia l'introduzione della dimensione funzionale degli elementi, oltre a quella topologica e di "montaggio".

La complessità delle connessioni che presiedono la composizione architettonica, fin qui emersa, rende esplicita la necessità di formalizzare un modello di conoscenza di traduzione della realtà che tenga in considerazione i livelli molteplici di connessione tra le singole componenti che definiscono un sistema architettonico. Il modello deve altresì essere flessibile, capace di tradurre la complessità del reale, senza perdere la specificità e l'unicità delle singole esemplificazioni.

3.4 Gli standard per la rappresentazione della conoscenza in Architettura

Allo stato attuale, non esiste una ontologia formalizzata esclusivamente per il dominio dell'architettura. A livello internazionale, è stato codificato un modello concettuale unico di riferimento per tutto il patrimonio culturale: **CIDOC - CRM** *International Council of DOcumentation - Conceptual Reference Model*⁵³ dell'**ICOM** *International Council of Museum*⁵⁴.

È una ontologia formale di base che ha lo scopo di facilitare l'integrazione, la mediazione e lo scambio delle descrizioni, delle informazioni e della documentazione per la ricerca scientifica sui beni culturali tra fonti eterogenee: collezioni museali, siti archeologici, monumenti, conoscenze documentarie conservate negli archivi e nelle biblioteche⁵⁵.

Il modello concettuale predisposto da CIDOC - CRM è stato sviluppato, inizialmente, tenendo presenti in particolare le esigenze dei musei. A partire dal 1996, un gruppo di lavoro composto da informatici, archeologici, storici dell'arte, filosofi e studiosi di Biblioteconomia si è riunito, con la compartecipazione di ICOM e CIDOC⁵⁶. L'obiettivo era modellare uno strumento in grado di assolvere ad una serie di azioni necessarie per la crescita della comunità scientifica e della conoscenza connessa al patrimonio culturale:

- realizzazione della interoperabilità semantica tra gli schemi di metadati già strutturati da musei, archivi, istituzioni della memoria, biblioteche;
- rappresentazione della conoscenza offerta dalle collezioni di informazioni già strutturate;
- navigazione all'interno di collezioni eterogenee e distribuite con la formulazione di queries da rivolgere a sistemi di risorse integrate⁵⁷.

Il processo è iniziato dal basso verso l'alto, *bottom - up*, reingegnerizzando e integrando i contenuti semantici dei sempre più numerosi modelli di banche di dati e le strutture di documentazione afferenti a tutti i tipi di discipline museali, archivi e biblioteche, come base empirica.

Attraverso CIDOC - CRM viene offerta una architettura semantica capace di trasformare le diverse fonti in una risorsa globale, sia essa una biblioteca digitale di vaste dimensioni che una rete di fonti eterogenee.

Il modello proposto è ampio ed elastico. Comprende concetti tassonomicamente strutturati, chiamati "entità", e un insieme di relazioni semantiche, denominate "proprietà". Le proprietà sono definite in termini

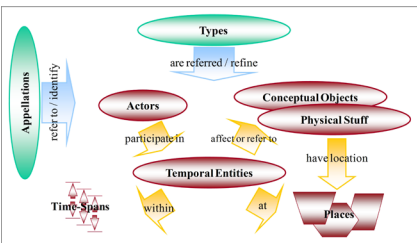


Fig. 3.2.1. Metaschema qualitativo di CIDOC - CRM: classi di descrizione di alto livello.

di “dominio” ovvero la classe per cui una proprietà è formalmente definita, e “range” vale a dire la classe che comprende tutti i potenziali valori di una proprietà.

La versione più recente è la 6.2.3 , rilasciata a maggio 2018⁵⁸, presenta 99 classi e 188 proprietà, con un incremento notevole delle proprietà che erano 141 nella versione 4.0 del 2004, mentre le classi erano 84⁵⁹.

Modellata in formato RDF, l'ontologia CIDOC contiene le relazioni più basilari per descrivere ciò che è accaduto in passato in relazione all'uomo, per esempio persone e cose che si incontrano nello spazio e nel tempo, parti e elementi complessivi, uso, influenza e riferimento. Essendo un modello generale, CIDOC propone estensioni per coprire domini caratteristici, modellate secondo lo stesso formalismo e collegabili direttamente tra loro:

- (i) CRMsci;
- (ii) CRMinf;
- (iii) CRMba;
- (iv) CRMarchaeo;
- (v) CRMdig;
- (vi) CRMgeo;
- (vii) CRMtex.

(i) CRMSci⁶⁰ *Scientific Observation Model* è un'ontologia formale destinata ad essere utilizzata come uno schema globale per l'integrazione di metadati relativi all'osservazione scientifica, alle misurazioni e dati processati nel dominio delle scienze descrittive ed empiriche - quali la biodiversità, la geologia, la geografia, l'archeologia, la conservazione del patrimonio culturale - e altri ambienti di ricerca. Il suo scopo principale è facilitare la gestione, l'integrazione, la mediazione, l'interscambio e l'accesso ai dati di ricerca attraverso la descrizione delle relazioni semantiche, in particolare quelle causali. Il modello, il cui scopo primario non è l'elaborazione dei dati stessi, sebbene le sue rappresentazioni si offrano per essere utilizzate in tal senso, fornisce superclassi e superproprietà che consentono attraverso una query di raggiungere qualsiasi entità archiviata in qualsiasi estensione compatibile con la sua struttura ontologica.

(ii) CRMInf⁶¹ *Argumentation Model* integra l'ontologia precedente attraverso una descrizione delle relazioni semantiche tra premesse, conclusioni e attività di ragionamento.

(iii) CRMba⁶² *Model for Archaeological buildings* è un'ontologia e uno schema RDF per codificare i metadati relativi alla documentazione degli edifici

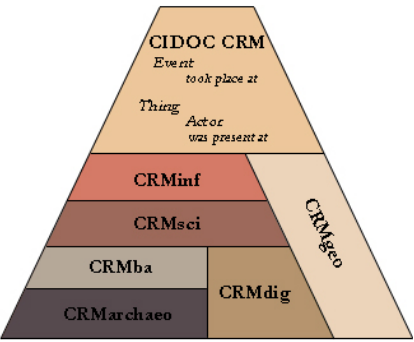


Fig. 3.2.2. Strutturazione del modello CIDOC con le sue estensioni.

archeologici. Il modello è stato concepito per supportare il processo di registrazione delle evidenze e delle discontinuità della materia sui manufatti archeologici, al fine di identificare l'evoluzione della struttura nel corso dei secoli e di registrare i rapporti tra ciascuna delle componenti dell'edificio, tra loro, e con l'edificio nel suo complesso. Ha lo scopo di esprimere le relazioni semantiche delle unità stratigrafiche di un'opera, tenendo conto della teoria dell'analisi stratigrafica degli edifici.

(iv) CRMarchaeo⁶³ *Excavation Model* è un'estensione di CIDOC - CRM creata per supportare il processo di scavo archeologico e tutte le varie entità e attività ad esso correlate. Il modello è stato creato partendo da standard e schemi già in uso presso le istituzioni nazionali e internazionali del patrimonio culturale e si è evoluto attraverso un'analisi approfondita dei metadati esistenti sulla documentazione archeologica applicata. Sfrutta i concetti forniti da CRMsci, da cui eredita la maggior parte dei principi geologici e stratigrafici che governano la stratigrafia archeologica - Matrix di Harris - estendendo questi principi.

(v) CRMdig⁶⁴ *Model for Provenance Metadata* è un'ontologia e schema RDF nata per codificare i metadati relativi alle fasi e ai metodi di produzione dei prodotti di digitalizzazione e delle rappresentazioni digitali come 2D, 3D o persino modelli animati creati da varie tecnologie. L'obiettivo è documentare e connettere informazioni sulla provenienza dei dati. Le sue caratteristiche distintive, rispetto ad altri modelli con finalità simili, sono l'inclusione completa dei processi di misurazione fisica iniziale e dei loro parametri.

(vi) CRMgeo⁶⁵ *Spatiotemporal Model* è un'ontologia formale pensata per essere utilizzata come schema globale per l'integrazione delle proprietà spaziotemporali di entità e oggetti. Il suo scopo principale è quello di fornire uno schema coerente con il CIDOC - CRM per integrare la geoinformazione utilizzando concettualizzazioni, definizioni formali, standard di codifica e relazioni topologiche definite dall'*Open Geospatial Consortium* OGC⁶⁶.

(vii) CRMtex⁶⁷ *Model for The Studi of Ancient Texts* è un'estensione di CIDOC - CRM creata per supportare lo studio di documenti antichi identificando le entità testuali rilevanti e modellando il processo scientifico relativo allo studio di testi antichi e delle loro caratteristiche al fine di favorire l'integrazione con altri campi di ricerca del patrimonio culturale, come l'archeologia e storia. Il concetto di “testo scritto”, introdotto

dall'estensione, è inteso a identificare un'entità comune consistente in una particolare caratteristica (cioè un insieme di “glifi”) creata (cioè scritta) su vari tipi di supporto, con significato semiotico e la dichiarata scopo di trasmettere un messaggio specifico verso un determinato destinatario o gruppo di destinatari.

È ora chiaro che l'ontologia CIDOC, con tutte le sue estensioni, mira a cogliere la sola semantica soggiacente alle strutture di dati ma non si occupa di strutturare la terminologia relativa agli *item* che fanno parte del patrimonio culturale.

Il compito di formalizzare i vocaboli del dominio culturale è assolto, per la Storia dell'Arte e l'Architettura, dall'**AAT** *Art and Architecture Thesaurus*⁶⁸. Sviluppato dal *Getty Research Institute* negli anni Ottanta, è una risorsa strutturata, utilizzata da indicatori, catalogatori e altri professionisti interessati alla gestione delle informazioni nei settori dell'arte e della architettura.

I principi fondamentali in base al quale è stato costruito e sviluppato l'AAT sono stati stabiliti nel 1981:

- il suo campo di applicazione include la terminologia necessaria per catalogare e recuperare informazioni relative all'arte visiva e all'architettura;
- è costruito utilizzando standard nazionali NISO e internazionali ISO per la costruzione di tesauri;
- si basa sulla terminologia corrente, garantita per la sua utilizzazione da autorevoli fonti letterarie e convalidate dall'utilizzo da parte della comunità scientifica;
- viene compilato e modificato in risposta alle esigenze degli utenti.

È un vocabolario di dominio controllato che contiene termini generici e altre informazioni sui concetti, correlati tramite relazioni gerarchiche, di equivalenza e associative.

Nel database, il *record* di ciascun concetto - chiamato anche “soggetto” - viene identificato con un ID numerico univoco. Collegati ad ogni record, possono esservi sia termini che concetti correlati, un “*parent*” ovvero una posizione nella gerarchia, le fonti dei dati e le note.

Il vocabolario è multilingue e i termini forniti per ogni concetto possono includere la forma plurale del termine, la forma singolare, ordine naturale, ordine invertito, varianti di ortografia, forme scientifiche e comuni, varie forme di discorso e sinonimi che hanno diverse radici etimologiche.

Tra questi termini, uno è contrassegnato come il termine preferito, o “descrittore”. Essendo un vocabolario multilingue, possono esservi più descrittori che riflettono l'uso in più lingue. I termini in AAT possono essere usati per descrivere l'arte, l'architettura, le arti decorative, la cultura materiale e i materiali d'archivio. La sua copertura temporale varia dall'antichità al presente. I destinatari comprendono musei, biblioteche, collezioni di risorse visive, archivi, progetti di conservazione, progetti di catalogazione e progetti bibliografici.

All'interno della struttura gerarchica dell'AAT, la suddivisione principale tra i concetti avviene secondo “*facets*”. Ogni *facet* contiene una classe omogenea di concetti, i cui membri condividono le caratteristiche che li distinguono dai membri di altre classi. Ad esempio, il marmo si riferisce ad una sostanza utilizzata nella creazione di artefatti di arte e di architettura, pertanto si trova sotto il *facet* “Materiali”. I *facets* sono concettualmente organizzati in schemi che procedono da concetti astratti ad aspetti concreti di artefatti fisici e sono classificati in: concetti associati, attributi fisici, stili e periodi, agenti, attività, materiali, oggetti, nomi di marchi. All'interno di questi gruppi di facets sono disposti gruppi omogenei di terminologia in cui si distingue un “*broader term*” che fornisce una classe o un genere immediato, più ampio, che serve a chiarire il significato, e un “*narrower term*” che è sempre un “tipo del”, un “esempio del”, una “manifestazione del” suo contesto più ampio. Per esemplificazione, i disegni ortografici sono un contesto più ampio per le planimetrie poiché tutte le planimetrie sono disegni ortografici.

Oltre all'AAT, il Getty Research Institute ha sviluppato altri vocabolari, tutti complementari: l'ULAN *Union List of Artist Names*, il CONA *Cultural Objects Name Authority* e il TGN *Thesaurus of Geographic Name*.

Per questo motivo, l'AAT non contiene nessun soggetto iconografico né nomi propri. Ogni concetto è una esemplificazione di una moltitudine, una cosa generica, non un esempio singolo, un caso specifico. Per esempio, il termine generico di Certosa si trova nell'AAT, ma il monastero specifico della Certosa di San Lorenzo, a Padula si trova nel TGN; e ancora, l'autore Gaetano Barba è un campo che non rientra nelle specificazioni di questo dizionario essendo inclusa, invece, nell' ULAN, mentre la specifica denominazione della Cattedrale di Chartres si trova nel CONA.

Come già indicato, il tesoro del Getty non è una risorsa conclusa, non è esaustiva ma cresce attraverso il contributo di diversi istituti:

- per lo spagnolo, il *Centro de Documentación de Bienes Patrimoniales* del Cile;

- per l'olandese, il *Rijksbureau voor Kunsthistorische Documentatie*;
- una traduzione cinese è in corso ad opera del *National Digital Archives Program* di Taiwan;
- la traduzione tedesca è stata intrapresa dall' *Institut für Museumsforschung* di Berlino;
- circa 3.000 concetti italiani sono stati forniti dall'ICCD di Roma;
- i 3.000 termini francesi provengono dal CHIN.

L'AAT è stato rilasciato dal Getty come Linked Open Data sotto la *Open Data Commons Attribution Licence* (ODC-By) 1.0.

Note

1 [http://www.treccani.it/enciclopedia/semiologia_\(Enciclopedia-Italiana\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/semiologia_(Enciclopedia-Italiana)/)

2 <http://www.treccani.it/enciclopedia/semiotica/>

3 In verità come scrive Sandro Balletta, i due termini all'inizio della loro comparsa non erano propriamente sinonimi. «Semiotica» fu coniato da Ch. S. Peirce, un filosofo, «semiologia» è un neologismo di de Saussure, un linguista. Vista la matrice di provenienza, sebbene in entrambi i casi si trattasse di «scienza dei segni», i due termini avevano una diversa sfumatura semantica. Il primo designava lo studio di tutti i tipi di segni, il secondo lo studio dei segni analoghi a quelli del linguaggio naturale e analizzabili in significanti e significati (secondo la terminologia di de Saussure). La distinzione, seguita agli inizi della disciplina, oggi, però, tende a sfumare (Balletta, 2015).

4 <http://www.treccani.it/vocabolario/linguistica/>

5 Bréal, M., “Essai de sémantique”, 1897. https://fr.wikisource.org/wiki/Essai_de_S%C3%A9mantique

6 <http://www.treccani.it/enciclopedia/semantica/>

7 L'Architettura di Marco Vitruvio Pollione tradotta e commentata dal marchese Berardo Galiani. Prefazione di Alessandro Pierattini, (ristampa anastatica dell'edizione di Napoli, 1790), Roma, Editrice Librerie Dedalo, 2005.

8 De Fusco, R., “Excursus sul rapporto tra linguistica e architettura”, <http://unina.academia.edu/httpwwwrenatodefuscoit>

9 I dieci libri dell'Architettura di M. Vitruvio, tradotti e commentati da Monsignor Daniel Barbaro, Francesco de' Franceschi Senese, Venezia 1584.

10 <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/392625>

11 De Fusco, R., “Semiologia architettonica in nuce”, <http://unina.academia.edu/httpwwwrenatodefuscoit>

12 Dorfles, G., “Valori iconologici e semiotici in architettura”, Op.cit, 1969, 16.

13 Garajová, K., Manualetto di stilistica italiana, 2014. https://digilib.phil.muni.cz/bitstream/handle/11222.digilib/131655/Books_2010_2019_077-2014-1_4.pdf

14 Quintrand, 1985.

15 Mitchell, 1990.

16 Lugli, E., “Measuring the Bones: On Francesco di Giorgio Martini's Saluzzianus Skeleton”, Art History, 2015, 38(2). pp. 346-363.

17 Murphy, 2013.

18 Un vocabolario controllato non è altro che una lista di parole sottoposte a norme, ben precise e riconosciute, che danno un ordinamento all'elenco dei termini. È dotato di caratteristiche specifiche quali la non ambiguità dei termini, la presenza di una definizione per ognuno di essi, la correlazione tra i sinonimi di un dato termine, ecc.

19 L'etimologia della parola è legata al latino thēsaurus, e al greco antico θησαυρός thesaurós (cioè “tesoreria”). L'origine ci permette di comprendere lo scopo più elevato del tesoro quale strumento di accesso a banche di dati tramite parole chiave ossia i termini del vocabolario, codificati tra loro in una rete gerarchica e relazionale.

20 Le definizioni sono tratte dal GRADIT Grande dizionario italiano dell'uso curato da Tullio De Mauro e si riferiscono, rispettivamente a Tecnicismi dell'Architettura, della Fisica e dell'Idraulica.

21 Gruber, 1993.

22 “An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization”. La definizione è stata formulata da Studer et al. nel 1998 e proposta, accogliendo il lavoro di Borst et al. dell'anno precedente, come estensione e raffinamento di quella formulata nel 1993 da Gruber, per il quale “An ontology is a specification of a conceptualization”.

23 Staab, et al., 2013.

24 Il World Wide Web Consortium, anche conosciuto come W3C, è un'organizzazione non governativa internazionale che ha come scopo quello di sviluppare tutte le potenzialità del World Wide Web. Al fine di riuscire nel proprio intento, la principale attività svolta dal W3C consiste nello stabilire standard tecnici per il World Wide Web inerenti sia i linguaggi di markup che i protocolli di comunicazione. <https://www.w3.org/>
<http://www.w3c.it/>

25 Berners-Lee, et al., 2001.

26 Berners-Lee, et al., 2001.

27 Niang, 2013.

28 <http://nevit-notes.blogspot.com/2011/04/uri-url-e-urn.html>

29 <https://www.w3.org/standards/semanticweb/ontology>

30 Questo aspetto è affrontato più nel dettaglio al capitolo 6.

31 I database relazionali e le loro caratteristiche sono affrontati nel capitolo 6, in rapporto ai database a grafo.

32 Messaoudi, 2017.

33 Marchetti, et al., 2008.

34 Biagetti, 2016.

35 <http://www.intelligenzaartificiale.it/web-semantic/>

36 Guarino, 1997; Guarino, 1998; Niang, 2013.

37 Upper ontologies o top-level ontologies.

38 Biagetti, 2016.

39 Messaoudi, 2017.

40 SUMO Suggested Upper Merged Ontology è stata sviluppata a partire dal 2000 e attualmente è gestita da Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE. Si è imposta come standard per questo tipo di ontologie e agisce come ontologia fondazionale per le ontologie di dominio. Contiene, infatti, le entità generali che non appartengono ad alcun dominio scientifico, e che possono servire ad un ampio numero di campi scientifici: le funzioni numeriche, le unità di misura, i concetti temporali, le relazioni spaziali, i processi e le proprietà generali.

41 L'ontologia fondazionale DOLCE è stata sviluppata da Nicola Guarino e dall'Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione del CNR di Trento e si caratterizza per la capacità di rispecchiare le strutture proprie del linguaggio naturale e dell'attività cognitiva umana e di senso comune.

42 Vedi paragrafo 3.4.

43 Cattani, et al., 2004.

44 I rapporti fisici formalizzati da più tempo sono quelli che descrivono un contatto (copre/coperto da, si appoggia/gli si appoggia, taglia/è tagliato, riempie/è riempito) e quelli che descrivono un'uguaglianza (uguale a, si lega a).

45 Claramunt, et al., 2001; Claramunt, et al., 2001.

46 Brogiolo, 1997; Gross, 2001; Medri, 2003.

47 De Luca, 2007.

48 Aurnague, et al., 1993; Simmons, 1994; Goulette, 1999.

49 Goulette, 1999; De Luca, 2007.

50 Alcuni dei trattati di architettura ai quali si fa riferimento sono:

- Il trattato dei Dieci Libri di Architettura, di Marco Vitruvio Pollionio, scritto intorno all'anno 27 a.C.;
- Il trattato De Re Aedificatoria, di Leon Battista Alberti, stampato per la prima volta nel 1485;
- Il trattato di Architettura di Sebastiano Serlio, stampato a Venezia nel 1537;
- La Regola delli Cinque Ordini d'Architettura, di Giacomo Barozzi da Vignola, stampato nel 1562;
- The classical orders of architecture di Chiratham edito in Italia nel 1985.

51 Ward Perkins, et al., 1962; Gruben, et al., 1987; Rocco, 2003; <http://www.wikitecnica.com/base/>

52 Un esempio sono i riferimenti alla proporzione armonica di cui parla Rudolph Wittkower o i sistemi compositivi connessi alle forme della natura come la spirale aurea.

53 <http://www.cidoc-crm.org/>
CIDOC CRM nasce nel 1996 e dal 2006 è riconosciuto come uno standard ufficiale ISO 21127:2006, ora rivisto nell'ISO 21127:2014.

54 <http://icom.museum>
ICOM – International council of museums, istituita nel 1946, è una organizzazione internazionale di istituzioni e di professionisti nel campo museale, dedicata a definire standard e buone pratiche per la gestione delle collezioni museali. Attualmente fanno parte di ICOM 20.000 musei e 35.000 esperti del settore, e sono riconosciuti 119 comitati nazionali e 30 comitati internazionali, tra i quali International Committee for Documentation, CIDOC.

55 Doer, 2003; Doer, 2009.

56 <http://network.icom.museum/cidoc/>
CIDOC - International Committee for Documentation è una delle commissioni internazionali di ICOM. Si occupa della preservazione degli oggetti digitali, degli standard e dello sviluppo di modelli di dati per i musei, dello sviluppo di strumenti per la ricerca semantica applicata ai musei, e dal 1992 della facilitazione dello scambio della documentazione durante gli scavi archeologici.

57 Biagetti, 2016.

58 <http://www.cidoc-crm.org/Version/version-6.2.3-0>

59 Per avere maggiori dettagli sul processo di elaborazione negli anni di questa ontologia e visionare le diverse versioni che si sono succedute nel tempo: <http://www.cidoc-crm.org/versions-of-the-cidoc-crm>

60 <http://www.cidoc-crm.org/crmsci/>

61 <http://www.cidoc-crm.org/crminf/>

- 62 <http://www.cidoc-crm.org/crmba/>
- 63 <http://www.cidoc-crm.org/crmarchaeo/>
- 64 <http://www.cidoc-crm.org/crmdig/>
- 65 <http://www.cidoc-crm.org/crmgeo/>
- 66 <http://www.opengeospatial.org/>
- 67 <http://www.cidoc-crm.org/crmtex/>
- 68 <http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/aat/>

CAPITOLO QUARTO

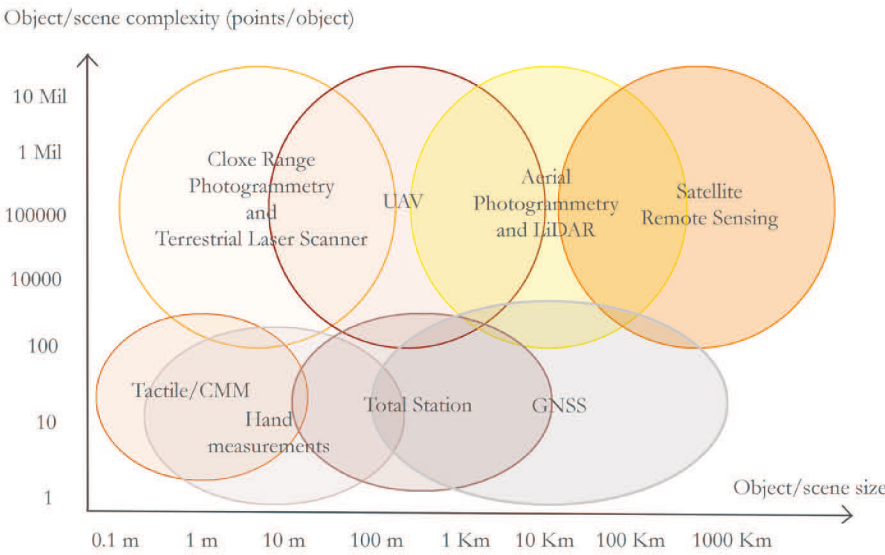
Rilievo reality-based. **Principi teorici, acquisizione ed elaborazione dei dati**

Ad oggi, il panorama di soluzioni e tecnologie della Geomatica, impiegate nel rilievo dei Beni Culturali, risulta diversificato in relazione alle variabili connesse all’oggetto del rilevamento. Metodologie e strumenti differenti vengono, di volta in volta, selezionati per rispondere alle diverse esigenze di accuratezza, economicità, velocità di acquisizione, dimensioni dell’oggetto. Rapporti gerarchici di priorità vengono attribuiti ai parametri decisionali in gioco, che non eludono la questione relativa al grado di rischio e pericolosità connessi alla perdita del patrimonio.

Al di là delle scelte operative praticate nei casi specifici, le metodiche e le strumentazioni che il settore disciplinare del rilievo ha predisposto e perfezionato, negli ultimi trent’anni, si basano sull’impiego di sensori tridimensionali, nel contesto generale del rilievo cosiddetto *reality-based*. Si tratta innanzitutto di strumenti che consentono di ottenere un’immagine tridimensionale della scena che viene inquadrata.

Una prima distinzione in classi di questi sensori deriva dal tipo di radiazione luminosa utilizzata per effettuare la misurazione: se utilizzano luce codificata, si parla di sistemi “attivi” o *range-based* (laser scanner, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, stazioni totali, ecc.); se sfruttano la luce naturale sono, invece, definiti “passivi” o *image-based* (tecnica fotogrammetrica, teodoliti...).

Fig. 4.1.1. Tecniche della Geomatica per l'acquisizione tridimensionale di dati, rappresentate in base alla dimensione della scena/oggetto ed alla complessità del modello digitale ricostruito.



4.1 Tecniche range-based. Fondamenti teorici e definizione dei sistemi ottici attivi

I sistemi ottici attivi consentono di registrare informazioni relative ad oggetti tridimensionali in tempi decisamente molto più rapidi rispetto alle tradizionali metodologie manuali, eludendo quel grado di soggettività nella raccolta dei dati che potrebbe condizionarne la successiva interpretazione. L'acquisizione di misure e distanze di oggetti è affidata ad un sensore elettronico in grado di riconoscere una luce codificata, diversa dalla luce ambientale, il che differenzia i sistemi ottici attivi da quelli passivi. Al pari di ogni metodologia di rilievo, i vantaggi offerti dai sensori attivi devono essere confrontanti con i possibili inconvenienti, dovuti, ad esempio, alla potenziale risposta alterata alla luce laser di alcuni materiali, o alla necessità di trovare un equilibrio tra l'enorme quantità di dati che questi dispositivi sono oggi in grado di catturare in pochissimo tempo e il successivo e oneroso lavoro di post elaborazione.

Alla base del funzionamento dei sensori ottici attivi vi è la proiezione sulla superficie dell'oggetto da rilevare di una luce, opportunamente codificata. Tale luce è caratterizzata da un contenuto informativo intrinseco, riconoscibile da un sensore elettronico, che rende il risultato della misurazione quasi indipendente dalla trama dell'oggetto considerato. Grazie alla codifica, i sensori tridimensionali attivi possono acquisire in forma digitale il comportamento spaziale di una superficie traducendolo in un'immagine - *range map* - avente in ciascun pixel le coordinate spaziali

(x, y, z) espresse in millimetri, eventualmente arricchite con informazioni sul colore (R, G, B) o dal fattore di riflessione del laser (Y).

I dispositivi che impiegano tecniche attive per l'acquisizione tridimensionale di punti sono chiamati *range cameras* e, tra questi, i più diffusi sono gli scanner 3D basati su luce laser¹.

4.1.1 Tipologia e classificazione dei sensori attivi

In relazione al principio operativo di funzionamento, scelto in base alle dimensioni dell'oggetto da catturare e la distanza tra questo ed il sensore dello scanner, è possibile distinguere due grandi tipologie di strumentazioni:

- sistemi basati sulla triangolazione;
- sistemi basati sulla misura di distanza.

In particolare, i primi sono indicati per volumi generalmente inferiori al metro cubo, i secondi, per volumi superiori.

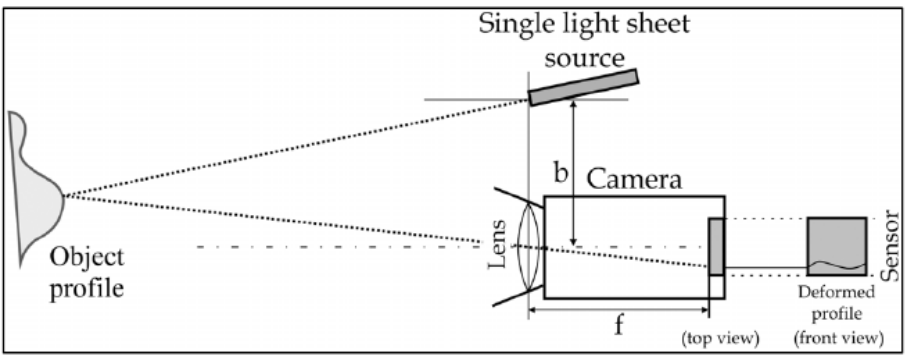
• Sistemi basati sulla triangolazione

Il modello di calcolo delle informazioni di misura è, per questa tipologia, incentrato sul principio della triangolazione.

Il dispositivo ottico attivo è composto da un emettitore di onde luminose e da uno o più sensori passivi posti ad una distanza nota tra loro detta "base". Il segnale luminoso viene emesso in direzione dell'oggetto da registrare e, successivamente, acquisito, dopo la riflessione sulla superficie dello stesso, dal sensore, grazie ad un insieme di componenti meccaniche e specchi. In questa impostazione, la sorgente luminosa, l'oggetto che riflette il segnale codificato e il sensore che registra l'impulso riflesso, formano un triangolo (Figura 4.1.2). Attraverso l'applicazione di semplici regole trigonometriche, è possibile stimare con esattezza la distanza intercorrente tra i punti dell'oggetto e il sensore ottico.

Una classificazione dei sensori basati sul principio della triangolazione, distingue: (i) sensori a singolo spot laser; (ii) sensori a lama di luce laser; (iii) sensori a lama di luce laser in movimento; (iv) sensori con proiezione di pattern. Il criterio di differenziazione è legato alla tipologia di luce codificata che investe l'oggetto tridimensionale (singolo fascio di luce che produce un puntino luminoso sull'oggetto (i); insieme di punti che compongono un segmento (ii) e (iii); pattern come cerchi in bianco e nero, strisce verticali colorate, griglie rettangolari² (iv)) e alla modalità di emissione (statica o in movimento).

Fig. 4.1.2. Sistema di misurazione tridimensionale
basato sul principio di triangolazione.



Appare esplicito che i sistemi a triangolazione, pur generando risultati estremamente accurati (anche 0.1 mm), in virtù delle loro caratteristiche hanno un utilizzo limitato ad acquisizioni di oggetti di piccola volumetria.

• **Sistemi basati sulla misura di distanza**

A differenza dei sistemi a triangolazione, i dispositivi basati sulla misura di distanza consentono di acquisire oggetti con una volumetria maggiore in funzione della misurazione di quello che viene definito Tempo di Volo - *Time of Flight* T.O.F.- ovvero il lasso di tempo che intercorre tra l'andata e il ritorno del segnale luminoso. Conoscendo questa funzione è possibile determinare il valore della distanza e degli angoli tra il sensore ed i punti della superficie da acquisire, che si traducono in coordinate tridimensionali³. La notevole riduzione dei tempi di acquisizione, dovuta alla velocità della luce comporta, però, un aumento dell'incertezza della stima, che si attesta molto raramente sotto i 2 mm.

La stima delle coordinate dei punti può avvenire con due procedimenti:

- misura diretta del Tempo di Volo;
- misura indiretta offerta dalla modulazione dell'intensità luminosa e dagli sfasamenti di segnale.

Nei **sistemi a misura diretta del Tempo di Volo** viene sfruttato un breve impulso luminoso - *Pulsed Wave* PW - per il calcolo delle distanze. Parte dell'energia luminosa, generata dalla sorgente verso l'oggetto, viene retro-diffusa, raccolta e convertita dal sensore in un segnale elettrico. La misura del tempo avviene, in questo caso, considerando le frazioni di secondo che intercorrono tra il momento di emissione del segnale e quello della sua ricezione da parte del ricevitore, che acquisisce informazioni sui segnali luminosi che superano una certa soglia di valori.

La distanza risulterà quindi pari a

$$r = \frac{TOF \cdot c}{2} \quad (4.10)$$

in cui:

r , è la distanza effettiva che intercorre tra il sensore e la superficie da acquisire;

T.O.F., rappresenta il tempo di andata e ritorno del segnale luminoso;

C , è la velocità della luce, assunta pari a 3×10^8 m/s.

Nei **sistemi a modulazione di fase** il segnale emesso non è un impulso luminoso bensì una radiazione continua - *Continuous Wave* CW- la cui intensità è modulata sinusoidalmente a una frequenza nota. La retrodiffusione sulla superficie dell'oggetto restituisce un'onda luminosa sinusoidale ritardata rispetto a quella trasmessa e quindi caratterizzata da una differenza di fase con essa. Analogamente all'approccio precedente, la stima della distanza si basa su un confronto tra il segnale applicato al laser per generare l'onda luminosa trasmessa e il segnale generato dalla riconversione in segnale elettrico della luce retro-diffusa dalla superficie e ricevuta dal sensore.

4.1.2 Caratterizzazione dei sensori tridimensionali: risoluzione, precisione e accuratezza

La qualità del prodotto digitale è influenzata dalle caratteristiche ottiche ed elettroniche dei sistemi di acquisizione utilizzati. Tale qualità è valutata rispetto a tre parametri che nel 2007 l' *International Standard Organization* - ISO ha definito nel Vocabolario Internazionale di Metrologia - VIM :

- risoluzione;
- accuratezza;
- precisione (o incertezza di misura).

Stimare questi parametri permette di quantificare il valore dell'incertezza delle coordinate spaziali acquisite, incertezza dovuta a tutti quei fattori che possono intervenire durante l'acquisizione ed il processamento dei dati⁴. Conoscere questi valori permette di stabilire la cosiddetta "tracciabilità metrologica" del processo e l'affidabilità dell'approssimazione discreta tridimensionale delle superfici rilevate con questi sistemi.

La **risoluzione** è definita come il più piccolo dettaglio geometrico che

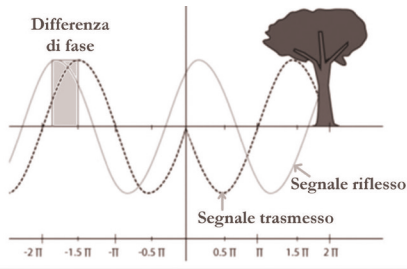


Fig. 4.1.3. Schema di funzionamento di una
strumentazione a Modulazione di Fase per
l'acquisizione dei dati.

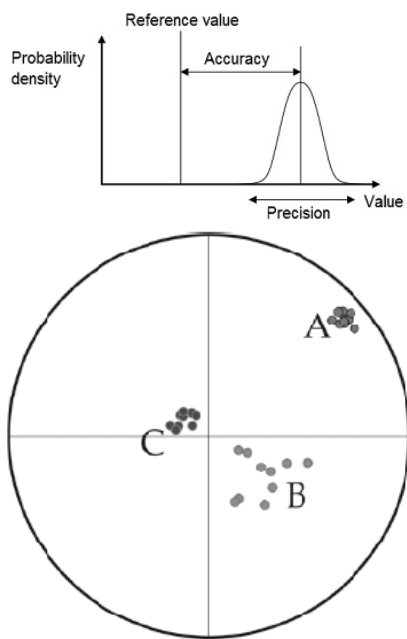


Fig. 4.1.4. Esempificazione dei concetti di accuratezza e precisione. Il sensore A è preciso ma non accurato, il B è più accurato di A ma meno preciso, il sensore C è preciso e accurato.

può essere catturato nella scena, ottenuto discretizzando una superficie continua in base ad un passo di campionamento - *sampling step* -, che viene stabilito in fase di programmazione delle acquisizioni. Le caratteristiche ottiche, meccaniche ed elettroniche di una range camera influenzano la capacità di acquisire dettagli. In particolare, maggiore è la capacità di focalizzazione della luce del sistema di lenti della camera, maggiore sarà la quantità di pixel delle immagini prodotte dal sensore e quindi la risoluzione. A seconda del comportamento che può assumere la strumentazione sui tre assi, possiamo distinguere tra una “risoluzione orizzontale” (o laterale), una “risoluzione in profondità” e una “risoluzione massima”⁵.

L’accuratezza e la precisione sono legati all’errore insito nella misurazione. Il valore di ogni misura è sempre un’approssimazione del valore reale. Tale approssimazione dipende dall’errore, concettualmente scisso in due componenti, sistematica e casuale, fortemente incidenti nella stima del valore di misura. Le differenti condizioni di funzionamento degli strumenti, rispetto ad una condizione teorica ideale, rappresentano la componente sistematica dell’errore. La casuale, a sua volta, dipende dall’aleatorietà di alcuni parametri.

L’errore sistematico definisce l’**accuratezza** che, operando una taratura della strumentazione, può essere migliorata riducendo lo scarto medio rispetto al valore vero. L’accuratezza, dunque, si riferisce a quanto la misura prelevata è vicina al valore reale.

L’errore casuale influisce sulla **precisione** o “incertezza di misura”. Non potendo definire questa grandezza, data l’aleatorietà delle componenti che intervengono nella misurazione, si può solo descrivere la variabilità tra misure diverse attraverso la distribuzione dei valori di una variabile aleatoria, in genere approssimata e rappresentata con una curva Gaussiana, e calcolarne la deviazione standard. Con evidenza, pertanto, la precisione si riferisce a quanto si avvicinano tra di loro misurazioni indipendenti ossia esprime il grado di dispersione di dati, rilevati individualmente e costituente un campione, rispetto al valore medio della serie cui appartengono ovvero alla media campionaria.

4.1.3 Pianificazione e acquisizione dei dati

Lo scopo finale della digitalizzazione dell’oggetto reale è il primo aspetto da considerare per pianificare correttamente il progetto di acquisizione dei dati. Le applicazioni dei modelli tridimensionali possono spaziare da un semplice supporto per presentazioni multimediali a un monitoraggio

dimensionale sofisticato. Nel primo caso è sufficiente una rappresentazione virtuale visivamente convincente dell’oggetto, mentre nel secondo è assolutamente obbligatoria una stretta corrispondenza metrica tra l’oggetto reale e la sua rappresentazione digitale. Poiché i parametri come l’accuratezza della rappresentazione e la risoluzione geometrica hanno un costo considerevole in termini di dati acquisiti e tempi di elaborazione, una scelta coerente con lo scopo finale, si rende indispensabile. Una volta che tali aspetti sono stati chiaramente identificati, l’oggetto da acquisire deve essere analizzato in termini di dimensioni, materiale e forma. Se i triangolatori permettono di ottenere modelli digitali anche molto accurati di oggetti di piccole dimensioni, le strumentazioni a Tempo di Volo e, in particolare, quelle a Modulazione di Fase, sono indicate per l’acquisizione tridimensionale di oggetti architettonici di medie e grandi dimensioni. La complessità morfologica dei manufatti e degli elementi decorativi potrà indicare la necessità di integrazione tra le diverse tecniche, qualora venga richiesta una rappresentazione complessiva e di dettaglio degli elementi presenti. La complessità materica e, in particolare, la presenza di superfici riflettenti e traslucide sono elementi che possono influire fortemente sulla qualità del risultato e che richiedono particolari accorgimenti e scelte di acquisizione.

Inoltre, a differenza dei sensori passivi (par.4.2.2), per la tecnologia attiva, la luce non influenza in linea teorica la qualità del dato, purchè contenuta entro certe soglie. La possibilità di lavorare in laboratorio per acquisire oggetti dalle dimensioni contenute, in condizione controllate di illuminazione, garantisce risultati sicuramente migliori rispetto a quelli ottenibili da una registrazione all’aperto.

L’acquisizione dei dati è un’operazione non troppo complessa. Per garantire la completezza del dato digitale è richiesta la registrazione di diverse range maps, con una buona sovrapposizione tra loro, al fine di assicurare una adeguata accuratezza del modello. Nel caso di acquisizioni con uno scanner a triangolazione è richiesta una percentuale di sovrapposizione tra le range maps contigue pari ad almeno il 30-40%. Con strumentazioni a Tempo di Volo è, in genere, richiesto un numero inferiore di scansioni ed una minore sovrapposizione, potendo usufruire anche di targets esterni per l’orientamento delle singole prese rispetto a punti noti.

E’ possibile distinguere due modalità di acquisizione:

- acquisizione statica;
- acquisizione dinamica.

- **Procedure di acquisizione statica**

Nel caso di acquisizioni con sensori da postazioni statiche, il processo si caratterizza per la registrazione di singole range maps, una per ciascuna stazione in cui è posto lo strumento.

Impostati i parametri che definiranno la qualità del dato (in generale la risoluzione, il numero di punti e la velocità di registrazione), per ogni postazione sono acquisite le coordinate polari dei punti in cui l'oggetto è discretizzato e trasformato in coordinate cartesiane (x, y, z), in un sistema di riferimento il cui centro è definito proprio dallo strumento in stazione. Nella fase di processamento del dato, delle trasformazioni spaziali consentono di ricostruire la posizione dei punti nello spazio, rispetto al sistema di riferimento adottato. La trasformazione è una roto-traslazione rigida a sei parametri, dove la traslazione indica il vettore spostamento dell'origine del sistema di riferimento e la rotazione determina i tre angoli di rotazione attorno ai tre assi. Nei rilievi terrestri, il calcolo di questi sei parametri avviene ai minimi quadrati sulla base di un certo numero di punti corrispondenti. La precisione della trasformazione viene valutata calcolando lo scarto quadratico medio - RMSE *Root Mean Square Error* - dei residui rispetto agli *n* punti corrispondenti.

- **Procedure di acquisizione dinamica**

L'integrazione dei sensori di misura con una piattaforma mobile, in grado di restituire la posizione della piattaforma ed i dati metrici 2D/3D georeferenziati, acquisiti in movimento, definisce nuovi sistemi di registrazione dinamica chiamati *Mobile Mapping System* - MMS.

Le tre principali componenti hardware di un MMS sono i sensori ottici, i sensori di navigazione e posizionamento (IMU/GNSS) e un'unità di controllo e sincronizzazione. Indipendentemente dal tipo di sistema e di applicazione specifica, il processo di acquisizione dinamica è basato sulla sincronizzazione al momento della registrazione del flusso di dati, raccolti senza procedere per stazione statiche successive ma in movimento continuativo.

Nel campo delle applicazioni terrestri *outdoor*, i sistemi più diffusi utilizzano la tecnologia LiDAR, da cui anche il nome di *Mobile Laser Scanning* - MLS, in cui la connessione tra i dati, acquisiti tramite sensori posizionati su autovetture, è stimata attraverso la continuativa determinazione della posizione della piattaforma tramite la rete GNSS. Il principale vantaggio derivante dall'impiego di questi sistemi è la possibilità di acquisire nuvole di punti dense, spesso anche in tempo reale, la velocità di acquisizione dei dati e l'elevata densità spaziale dei punti misurati.

Tuttavia, l'assenza di segnale GNSS e di dati di posizionamento nel caso di strutture *indoor* ne limita l'applicabilità in siffatti contesti. Per sopperire

a questa mancanza, sono state sviluppate recentemente nuove soluzioni, che sfruttano una piattaforma inerziale - *Inertial Navigation System* - IMU - ed un algoritmo di *Simultaneous Localisation and Mapping* - SLAM per la definizione della traiettoria e la ricostruzione tridimensionale delle scene acquisite. Esistono differenti soluzioni in commercio, montate su carrelli o su zaini⁶, che si diversificano per le diverse procedure di registrazione dei dati, strettamente dipendenti dal sistema considerato. Pertanto, tempi e velocità di acquisizione, aree di sovrapposizione tra range maps consecutive e modalità di mappatura degli ambienti risultano essere piuttosto variabili nelle varie soluzioni disponibili.

Il risultato contiene sempre, a prescindere dalla procedura di acquisizione prescelta, informazioni sulle coordinate tridimensionali dei punti della scena acquisita X,Y,Z. In alcuni casi, oltre ad essere acquisiti anche i valori di riflettanza delle superfici, al dato spaziale sono associate informazioni di colore (R,G,B). Questi dati, oltre a migliorare la visualizzazione del modello, possono aiutare la fase di allineamento delle scansioni aumentando la riconoscibilità delle caratteristiche comuni nelle diverse range maps.

4.1.4 Filtraggio e allineamento dei dati

Considerato che non sempre la strumentazione che si ha a disposizione è la più idonea per l'acquisizione del dato e che le condizioni ambientali di un rilievo influiscono sempre sul risultato digitale, la fase di **filtraggio** è molto spesso necessaria.

Grazie a questa operazione, dati ed elementi incompatibili con la geometria rilevata possono essere eliminati in virtù di opportuni algoritmi automatici o semi-automatici. Tali algoritmi operano individuando determinate caratteristiche morfologiche degli oggetti acquisiti o secondo valori di soglia di altezza. Quelli automatici risultano essere molto più rapidi ma con risultati non sempre accettabili, i semi-automatici, d'altronde, richiedono operazioni più complesse e tempi di processamento maggiori.

Particolarmente importante per la definizione della qualità dell'allineamento risulta essere l'eliminazione, con procedure più o meno automatiche o manuali, delle incoerenze visibili nelle scansioni. La presenza di elementi incoerenti, infatti, non solo peggiora la qualità dell'allineamento finale, ma soprattutto condiziona ed aggrava il lavoro in fase di post-processamento.

In generale, ogni range map acquisita da una specifica posizione è riferita a un sistema di coordinate di tipo strumentale ossia con l'origine situata nel

senso di distanza. Tale riferimento - *reference system RS* - ha orientamento ignoto e sei gradi di libertà nello spazio. Raccogliere più range maps di una scena o oggetto tridimensionale da più stazioni significa raccogliere informazioni 3D che rappresentano la stessa geometria ma con diversi sistemi di riferimento, il cui orientamento reciproco è generalmente sconosciuto. Per tale motivo, è necessario allineare tutti i dati tridimensionali nello stesso sistema di coordinate.

Il processo di **allineamento** richiede che ogni nuvola di punti sia roto-traslata, in funzione di sei parametri di libertà spaziale, per consentire l'unione delle singole scansioni. Se si include anche il parametro di scala, la trasformazione passa a sette parametri ed è detta *similarity transformation*. La procedura può essere condotta in tre modi diversi:

- orientamento con CMM - *Coordinate Measurement Machine*;
- orientamento con riferimenti fissi sulla scena;
- orientamento con algoritmi semi-automatici - ICP *Iterative Closest Point*.

- **Orientamento con CMM - *Coordinate Measurement Machine***

L'orientamento con CMM è condotto in caso di impiego di laser scanner 3D integrati con apparati *Coordinate Measurement Machine*. Si tratta di una sonda di misura collegata a dei meccanismi che consentono di calcolare i suoi spostamenti nello spazio. Quando alla sonda viene sostituita una testa laser, la nuvola di punti, ottenuta ed inserita nel sistema di riferimento dello strumento può essere successivamente orientata grazie alle informazioni fornite dal CMM. A causa dei vincoli di movimento imposti dal meccanismo, queste strumentazioni permettono l'acquisizione di oggetti di limitate dimensioni. Un'alternativa al CMM meccanico è rappresentato dai CMM *wireless*, che permettono la trasmissione di informazioni grazie alla comunicazione tra una base e una testa di scansione mobile.

- **Orientamento con riferimenti fissi sulla scena**

La procedura di orientamento dei dati può essere perseguita misurando alcuni elementi presenti nella scena catturata e utilizzati come punti di controllo, le cui coordinate possono essere ricavate anche con altri metodi, quali topografia o fotogrammetria. Identificando almeno 3 corrispondenze nelle range maps, è possibile assegnare le roto-traslazioni necessarie, in base ai punti di controllo utilizzati. E' possibile utilizzare sia targets volumetrici come sfere, coni, piramidi, ..., che targets piani.

L'impiego di *reference points* è particolarmente indicato in presenza di

superfici lisce e quando l'area di sovrapposizione tra le nuvole di punti risulta ridotta o insufficiente.

- **Orientamento con algoritmi ICP *Iterative Closest Point***

Gli algoritmi semi-automatici di allineamento sono basati sulla ridondanza dei dati e sfruttano la forma stessa dell'oggetto come riferimento da far corrispondere nelle diverse prese. Sono semi-automatici perché richiedono una fase iniziale di pre-allineamento manuale ed una di raffinamento che utilizza un algoritmo di ottimizzazione. Quelli maggiormente implementati nei software per la registrazione globale delle range maps sono basati sull'ICP *Iterative Closest Point*. Questo algoritmo consente di determinare per ogni punto della nuvola il punto più vicino - *closest point*. Collimando manualmente un numero minimo, almeno 3, di punti omologhi nelle aree di sovrapposizione tra due scansioni per introdurre un'approssimazione iniziale, l'ICP applica iterativamente una roto-traslazione rigida alla nuvola di punti considerata per sovrapporla a un'altra, considerata come fissa. In una seconda fase, l'allineamento automatico tra i dati avviene in un processo iterativo che tende a minimizzare la distanza media tra le nubi. Si distinguono due tipi di algoritmi ICP: (i) il metodo "punto-punto"; (ii) il metodo "punto-piano".

Nel primo metodo (i) viene scritta una funzione che è definita dalla somma dei quadrati delle distanze tra i punti omologhi delle nuvole. Per ogni punto della nuvola mobile vengono ricercati i punti contenuti all'interno di una sfera, il cui raggio è convenzionalmente il doppio della distanza media dei punti di una nuvola. Tra i punti così individuati, viene scelto quello più vicino come corrispondente.

Il metodo (ii) "punto-piano" considera un piano di *best-fit* e minimizza le distanze tra i punti di una nuvola ed i piani passanti per i punti dell'altra nuvola. In particolare, la funzione che viene scritta in questo caso è

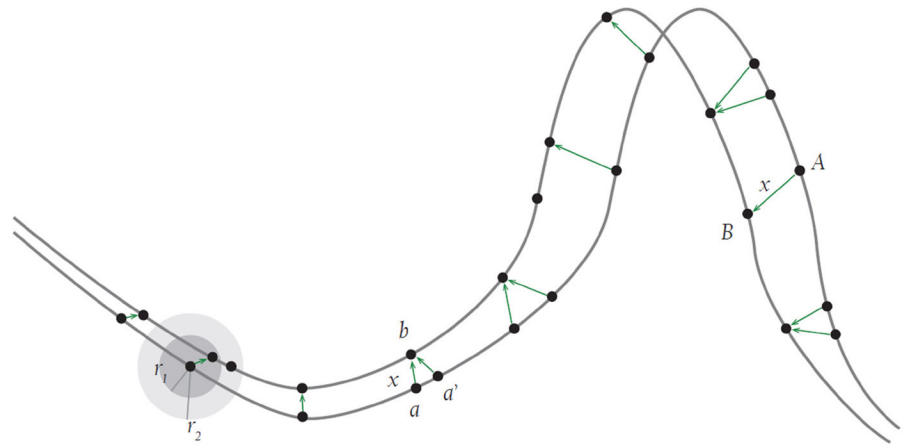
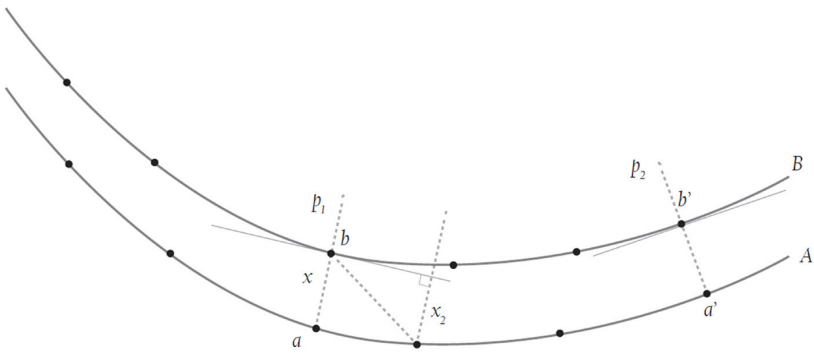


Fig. 4.1.5. Metodo di orientamento con algoritmi ICP, "punto-punto".

Fig. 4.1.6. Metodo di orientamento con algoritmi ICP, “punto-piano”.



definita dalla distanza tra il punto nella prima nuvola ed il piano tangente al suo corrispondente nella seconda, nella direzione normale al primo. Rispetto al metodo precedente, in questo caso il processo di convergenza verso la distanza minima è più veloce, potendo interagire su uno spazio bidimensionale.

La scelta dell’approccio di allineamento è fortemente dipendente dalla tipologia di strumentazione utilizzata per l’acquisizione dei dati. Nel caso dei sistemi a triangolazione, spesso si ricorre all’utilizzo di approcci che sfruttano l’ICP. Nei sistemi a Tempo di Volo, invece, può essere scelto sia un qualsiasi approccio ICP che il riconoscimento semi-automatico di targets. Questa tecnologia, riuscendo ad acquisire scene molto ampie consente in genere di restituire oggetti anche estesi e complessi con un numero piuttosto limitato di acquisizioni. L’utilizzo dell’ICP è in questo caso limitato ai casi in cui non sono stati utilizzati targets sul campo.

4.1.5 Generazione e correzione del modello poligonale

A partire dalla una nuvola di punti acquisita, si può ricostruire l’andamento delle superfici dell’oggetto registrato grazie alla **generazione di un modello poligonale**. Tale operazione risulta differente nel caso di una nuvola di punti strutturata - *structured point cloud* - o non strutturata - *unstructured point cloud* -. La prima, ottenibile con un sensore che utilizzi una lama di luce laser, consente di creare immediatamente una maglia triangolare poiché ad ogni segmento acquisito corrisponde una matrice semplice che contiene informazioni x,y,z di una serie di punti equidistanti. Tale maglia sarà composta, nei nodi pari, da un punto, dal punto alla sua destra e da quello sottostante. Nei nodi dispari, invece, sarà costituito da un punto, dal punto sottostante e da quello sottostante a sinistra. La seconda, ottenibile ad esempio con una strumentazione a tempo di

volo, non garantisce l’allineamento verticale tra i punti appartenenti a diverse linee di scansione, né una loro uguale distribuzione. In questo caso il meshing viene realizzato, generalmente, attraverso l’algoritmo di Delaunay (o simile), derivato dal diagramma di Voronoi.

Il diagramma di Voronoi è una delle più importanti rappresentazioni di un reticolo irregolare. Ogni poligono è definito dai segmenti che bisecano le congiungenti tra i diversi punti e sono ad esse perpendicolari. Le regioni del diagramma di Voronoi ricoprono tutto il piano senza intersecarsi. I poligoni alle estremità restano invece aperti.

Dal diagramma di Voronoi deriva la costruzione del reticolo di Delaunay, formato da triangoli che non si sovrappongono, dove nessun nodo del reticolo è incluso dai cerchi che circoscrivono i triangoli. Questo algoritmo prevede, in sostanza, la proiezione di tutti i punti tridimensionali su un piano, l’identificazione di quelli a distanza minima ed il loro collegamento. Una volta identificati i collegamenti, vengono verificati nello spazio. La verifica avviene considerando i cerchi che li circoscrivono: se tre punti appartengono ad ogni cerchio del reticolo, la triangolazione è unicamente definita. I centri degli stessi cerchi che rispettano la condizione corrispondono ai vertici dei poligoni di Voronoi. Stabiliti questi triangoli “potenziali” vengono ulteriormente verificati proiettandoli nello spazio e imponendo ulteriori valori di soglia, per consentire il mantenimento dei soli collegamenti coerenti con le condizioni fissate.

La costruzione della maglia di poligoni può produrre, sebbene raramente, risultati affetti da errori per i quali si rende necessaria una fase di **correzione** post fusione.

E’ possibile individuare due diverse tipologie di errori⁷:

- errori topologici;
- lacune.

La prima categoria raggruppa gli errori concernenti la creazione di connessioni tra elementi, che non rispettano le reali caratteristiche topologiche dell’oggetto che è stato acquisito. Gli errori più comuni sono la generazione di triangoli con gli stessi vertici, bordi condivisi tra triangoli, triangoli adiacenti con normali invertite. In tal caso, con modalità semi-automatiche la maglia viene ripulita e corretta.

La seconda tipologia riguarda la presenza di lacune in alcune aree, errore comune in seguito alla fusione del modello e legato alla presenza di zone d’occlusione, alla presenza di zone d’ombra, che interrompono

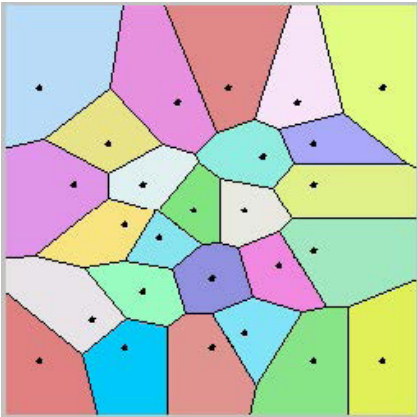


Fig. 4.1.7. Diagramma di Voronoi.

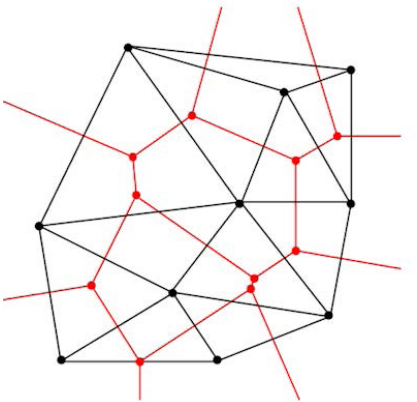


Fig. 4.1.8. Triangolazione di Delaunay.

la connessione fonte luminosa-sistema ottico di acquisizione, o alla riflessione del materiale. La ricostruzione di tali aree può essere ottenuta con procedure manuali le quali risultano, però, essere molto onerose in termini di tempo. In zone planari o con curvatura costante la ricostruzione è piuttosto semplice e speditiva. Dove invece le superfici hanno andamenti complessi e cambi di curvatura, l'unica soluzione è rappresentata dall'uso di superfici di fitting, che prolungano e interpolano le superfici presenti per ricostruire nella maniera più coerente possibile le parti mancanti.

4.1.6 Texturizzazione della maglia poligonale

Per la documentazione del patrimonio culturale, la rappresentazione fotorealistica del modello poligonale acquisito costituisce un passaggio importante e desiderabile in quanto offre, al tempo stesso, una rappresentazione geometrica e di apparenza visiva completa, estremamente efficace per scopi di analisi, manipolazione e visualizzazione.

Il processo di attribuzione del fotorealismo a un modello poligonale è chiamato texturizzazione ed è ottenuto mappando immagini a colori sui dati geometrici tridimensionali. I dati 3D possono essere, per precisione, sia in forma di punti che triangoli, in base alle applicazioni e ai requisiti. La texturizzazione di nuvole di punti tridimensionali consente una visualizzazione più rapida, ma per modelli 3D dettagliati e complessi non è un metodo appropriato. In caso di maglie poligonali, la texture è automaticamente mappata se i parametri della telecamera sono noti (ad esempio se si tratta di un modello fotogrammetrico e le immagini sono orientate,) altrimenti è necessaria una procedura interattiva (ad esempio se il modello è stato generato utilizzando sensori di distanza e la texture proviene da un sensore di immagine separato). La mesh tridimensionale e l'immagine 2D da mappare devono essere identificate al fine di trovare la trasformazione di allineamento necessaria per trasferire le informazioni di colore sulla mesh. L'allineamento 2D-3D è eseguito con l'approccio DLT⁸, spesso indicato come “metodo Tsai”⁹, in cui i punti corrispondenti tra la geometria 3D e un'immagine 2D da mappare sono cercati per recuperare i parametri di orientamento interno ed esterno della fotocamera con cui sono stati acquisiti gli scatti fotografici. Le informazioni sul colore vengono quindi proiettate (o assegnate) alla superficie dei poligoni utilizzando o una codifica del colore per ciascun vertice della maglia o proiettando una texture esterna¹⁰.

Le regole di proiezione dell'immagine sull'oggetto sono sostanzialmente tre: (i) proiezione planare; (ii) proiezione cilindrica; (iii) proiezione cubica.

La più semplice è quella planare, in cui la superficie su cui proiettare l'immagine è perpendicolare all'asse di proiezione. Nella cilindrica, l'immagine si avvolge lungo un asse attorno all'oggetto. Infine, nell'ultimo caso, quello di proiezione cubica, è il software che seleziona automaticamente le facce in base al loro orientamento prevalente e ad esso associa appropriate proiezioni planari.

Poiché i manufatti architettonici sono spesso oggetti complessi e non descrivibili attraverso geometrie semplici, vengono definite quasi sempre delle “sub-proiezioni”, ovvero delle proiezioni parziali. I software consentono così di sviluppare, automaticamente, con funzioni specifiche ,gli oggetti e di poter poi intervenire nell'ottimizzazione del risultato in maniera manuale.

4.2 Tecniche image-based. Fondamenti teorici e definizione della fotogrammetria

Tra le tecniche image-based, la più nota è la fotogrammetria, capace di derivare informazioni accurate, di tipo metrico e semantico, a partire da fotografie. Il processo fotogrammetrico, in generale, si basa sulla trasformazione dei dati, registrati in immagini bidimensionali, in informazioni tridimensionali, grazie alla definizione della relazione geometrica intercorrente tra i fotogrammi acquisiti e la scena/oggetto registrata al momento dello scatto. A tal scopo, il metodo richiede almeno due immagini della stessa scena statica o manufatto, acquisito da diversi punti di vista. Similmente a quanto avviene nella visione umana, se un oggetto è visto in almeno due immagini, le diverse posizioni relative dell'oggetto nei fotogrammi consentono, per la parallasse, una vista stereoscopica e la derivazione, dunque, di informazioni tridimensionali relative alla scena, estratte dall'area di sovrapposizione delle immagini.

La procedura necessita, evidentemente, di una grande esperienza per ricavare modelli 3D accurati e dettagliati da semplici fotografie e, fino a un decennio fa, era decisamente dispendiosa in termini di tempo. Oggi, grazie agli avanzamenti raggiunti dalla comunità della Computer Vision, sono disponibili molti protocolli completamente automatizzati e più facilmente gestibili in virtù dei quali, la tecnica fotogrammetrica è utilizzata in molti campi: dalla mappatura tradizionale, al monitoraggio strutturale e alla modellazione 3D della città, dall'industria cinematografica dei videogiochi alle ispezioni industriali, dalla documentazione del patrimonio al campo medico. A contribuire alla diffusione della fotogrammetria concorrono anche altri aspetti che precisano, di fatto, i vantaggi dell'approccio basato

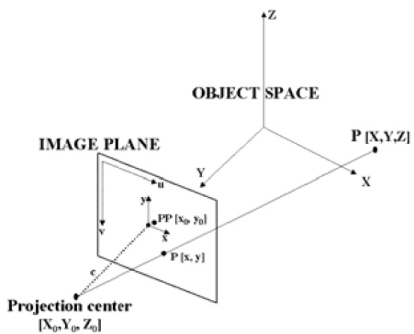


Fig. 4.1.9. Principio di collinearità: relazione tra il centro di proiezione prospettica della fotocamera, un punto dell'immagine e il suo corrispondente nello spazio.

sulle immagini: la considerazione che le fotografie contengono già tutta la documentazione necessaria per derivare informazioni tridimensionali, al contempo accurate e fotorealistiche, nonché la possibilità di ricostruire manufatti anche se scomparsi o considerevolmente modificati, impiegando immagini d'archivio. In aggiunta, essendo il processo basato sulla manipolazione di fotografie, gli strumenti di acquisizione possono essere economici, portatili, facili da usare con potenzialità di altissima precisione. Si tratta di sensori passivi come fotocamere digitali, in grado di registrare fotogrammi da cui ricavare dati tridimensionali utilizzando formulazioni di geometria prospettica o proiettiva. In relazione alle applicazioni e alla scala necessaria, le immagini possono essere catturate usando sensori terrestri, aerei o satellitari.

4.2.1 Equazione di collinearità e bundle adjustment

Il postulato di base del processo fotogrammetrico è il principio di collinearità, basato sulla ricostruzione del modello geometrico della prospettiva centrale applicato a immagini, di numero non inferiore a due. La collinearità stabilisce la relazione che intercorre tra l'immagine e lo spazio dell'oggetto definendo una linea retta - *retta di collinearità* - congiungente il centro di proiezione prospettica della camera, il punto P (x,y) sul piano immagine e il corrispondente punto P(X,Y,Z) dell'oggetto nello spazio (Figura 4.1.9).

Il modello è circoscritto dalla formula

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + x_0 \\ y &= -f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + y_0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

in cui:

f, individua la lunghezza focale della fotocamera;

x_0, y_0 , sono le coordinate del punto principale del sensore;

X_0, Y_0, Z_0 , costituiscono le coordinate di posizionamento del centro della prospettiva;

r_{11}, r_{12}, r_{13} , rappresentano gli elementi della matrice di rotazione¹¹;

x, y, sono le coordinate immagine 2D;

X, Y, Z, definiscono le coordinate dell'oggetto 3D.

I primi due elementi costituiscono i parametri di orientamento interno -

Principi teorici, acquisizione ed elaborazione dei dati

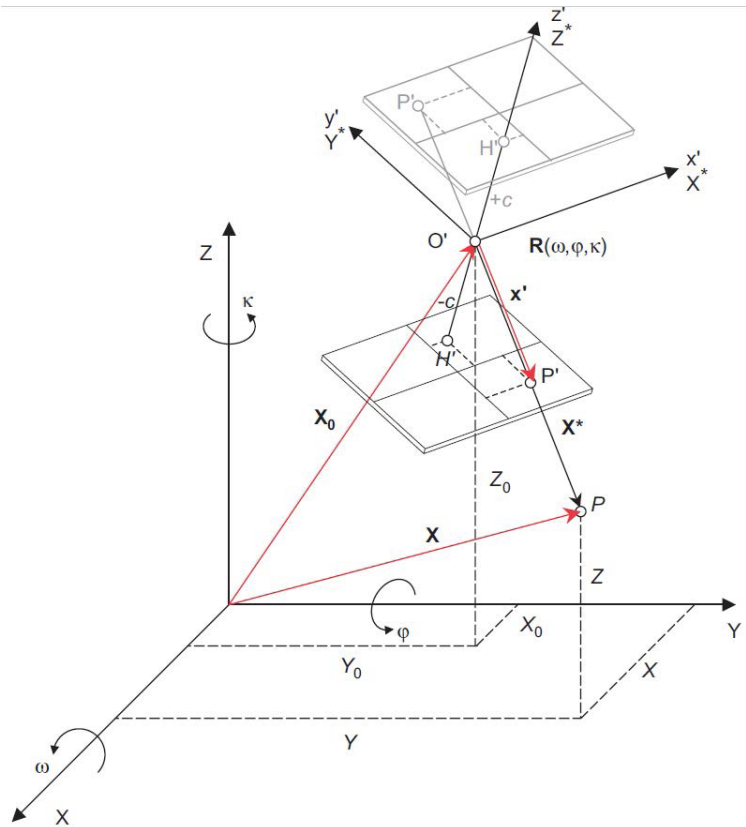


Fig. 4.2.0. Parametri di orientamento esterno tra sistema di riferimento oggetto e immagine.

Interior Orientation IO¹²; la seconda coppia quelli di orientamento esterno - Exterior Orientation EO¹³ (Figura 4.2.0).

Un'osservazione importante riguarda il sistema cui si riferiscono le misurazioni. Tutte le misure eseguite sulle immagini digitali (x,y) si relazionano a un sistema di coordinate espresso in pixel¹⁴ a differenza di quanto accade nelle equazioni di collinearità, ove le misure sono riferite al sistema di coordinate dell'immagine metrica. La conversione da coordinate pixel a immagine è eseguita con una trasformazione affine conoscendo le dimensioni del sensore e la dimensione dei pixel stessi (Figura 4.2.1).

Per ogni punto dell'immagine misurato in almeno due fotogrammi (generalmente denominati “punti di legame” o “punti omologhi” - *tie points*), è scritta un'equazione di collinearità (4.11). Tutte le equazioni formano un sistema la cui soluzione è generalmente ottenuta con un metodo iterativo dei minimi quadrati, secondo il modello di Gauss-Markov. Il metodo, chiamato *bundle adjustment* (Figura 4.2.2), richiede alcune buone approssimazioni iniziali dei parametri sconosciuti (solitamente quelli di orientamento esterno) e fornisce una determinazione simultanea di

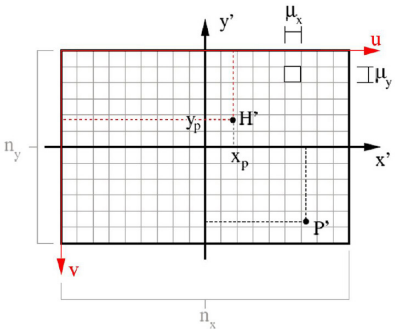


Fig. 4.2.1. Sistema di riferimento di coordinate immagine per fotocamere digitali.

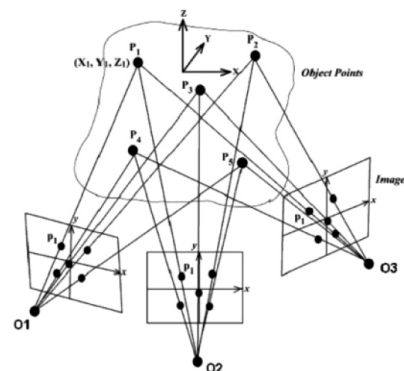


Fig. 4.2.2. Metodo di bundle adjustment.

tutti i coefficienti del sistema, unitamente alla stima della precisione e dell'affidabilità delle incognite. Se ad essere ignoti sono anche i parametri di orientamento interno, il metodo è denominato *selfcalibrating bundle adjustment*.

Il sistema di equazioni può essere espresso come

$$-e = A * x * l \quad (4.12)$$

ove:

e , è un vettore di errore;

A , identifica una matrice dei coefficienti delle equazioni di collinearità $n \times m$ (numero di osservazioni \times numero di incognite, con $n > m$);

x , rappresenta il vettore dei parametri sconosciuti (orientamento esterno, coordinate 3D dell'oggetto, eventualmente i parametri di orientamento interno);

l , definisce il vettore delle osservazioni ossia delle misurazioni effettuate.

Per perfezionare il calcolo, generalmente è aggiunta una matrice di peso P allo scopo di stimare e pesare le osservazioni e i parametri sconosciuti durante il processo. In aggiunta, sono introdotti nel calcolo almeno 3 *Ground Control Points* GCP ovvero dei valori esterni noti per controllare e ottimizzare la trasformazione di similarità spaziale tra l'immagine lo spazio dell'oggetto. Un'altra possibilità per la risoluzione dell'equazione 4.12 è di considerare, in un sistema libero, almeno una misura nota dell'oggetto per recuperare la scala corretta. Si tratta di un processo di ridimensionamento da eseguirsi contestualmente al calcolo del bundle adjustment per evitare una successiva compensazione della sua possibile deformazione.

L'intero flusso di lavoro fotogrammetrico, necessario per ricavare da un insieme di immagini, informazioni tridimensionali metriche accurate di un oggetto, è articolato in una serie di passaggi: (i) acquisizione delle immagini digitali; (ii) calibrazione e orientamento della fotocamera; (iii) estrazione delle misurazioni tridimensionali; (iv) generazione del modello poligonale; (iv) texture mapping e visualizzazione.

4.2.2 Pianificazione e strategia di acquisizione delle immagini digitali

L'intero processo di ricostruzione tridimensionale di un oggetto reale è condizionato principalmente dalla qualità delle immagini. Diventa, quindi,

indispensabile la pianificazione delle operazioni, la scelta del sensore e la strategia di acquisizione delle stesse, essendo elementi che influenzano notevolmente il risultato finale.

Molteplici fattori orientano la qualità delle immagini digitali¹⁵:

- risoluzione del sensore;
- tipologia di obiettivo;
- impostazioni di scatto;
- nitidezza;
- contrasto;
- illuminazione.

Le camere digitali catturano la luce su un sensore elettronico, che codifica le informazioni in una matrice di valori di luminanza. La risoluzione dei sensori in commercio per applicazioni di fotogrammetria terrestre, ovvero il numero di pixel che compongono l'immagine digitale, è ormai di milioni di pixel per le tre categorie principali, compatte, reflex e bridge.

Oltre al sensore, è fondamentale la scelta della tipologia di obiettivo da utilizzare. Gli obiettivi sono composti da sistemi di lenti che si spostano reciprocamente in base alla distanza di messa a fuoco e possono essere a focale fissa o variabile (le camere compatte e le bridge montano obiettivi a focale variabile). La distanza focale e le dimensioni del sensore definiscono l'angolo di campo, ovvero l'angolo visivo inquadrato dall'obiettivo. Le tre categorie principali di obiettivi sono:

- i grandangoli, con focali dai 18 ai 35 mm;
- gli obiettivi standard, con focali dai 38 a 50 mm;
- i teleobiettivi, con focali superiori a 90 mm.

Alcune impostazioni di scatto della fotocamera possono incidere in modo significativo sulla qualità dell'immagine digitale. In particolare:

- la messa a fuoco, automatica o manuale;
- le modalità di esposizione dell'immagine;
- il bilanciamento dei bianchi;
- la sensibilità ISO del sensore alla luce.

La quantità di luce che arriva al sensore, e che consente di acquisire l'immagine, è funzione di due fattori, ovvero l'apertura del diaframma e la velocità di otturazione. L'apertura del diaframma regola la quantità

di luce che attraversa l'obiettivo. La velocità di otturazione è il tempo di esposizione alla luce del sensore. Questi due fattori, se non ben bilanciati, possono generare un'immagine sotto-esposta o sovra-esposta. L'illuminazione della scena da acquisire può influire sulla qualità delle gamme cromatiche acquisite, che possono discostarsi in maniera significativa da quelle reali. Alcune camere possono consentire una correzione ed un dosaggio dei colori presenti nell'immagine. La sensibilità del sensore alla luce influenza la resa delle immagini. Più alto è questo valore, maggiore risulterà la sensibilità alla luce. L'aumento dell'ISO è necessario in caso di ambienti con scarsa illuminazione. Tuttavia, un valore elevato amplifica il segnale ricevuto dal sensore ed il rumore in esso presente.

Il grado di nitidezza delle immagini può influire significativamente sulla ricerca delle corrispondenze dei punti omologhi e dipende dalla messa a fuoco e dalla velocità di otturazione (in genere si scelgono valori superiori all'inverso della lunghezza focale utilizzata). Il livello di nitidezza andrebbe controllata per ogni immagine acquisita durante una campagna di rilevamento.

Un buon grado di contrasto è fondamentale per la lettura di tutti gli elementi architettonici, cercando di evitare zone d'ombra o parti sovra-esposte. La correzione di questi difetti è spesso possibile anche in una fase successiva. Il contrasto è funzione dell'apertura del diaframma e della velocità di otturazione.

Le condizioni di illuminazione della scena da acquisire, che dovrebbero risultare quanto più omogenee possibili, possono influire in modo significativo sulla qualità delle texture. Per acquisizioni all'aperto, la presenza di un cielo nuvoloso offre le migliori possibilità di ottenere texture omogenee. Il controllo dell'esposizione è altresì fondamentale in questi casi e soprattutto nelle acquisizioni ad assi convergenti. Accade, infatti, frequentemente di dover acquisire alcune immagini dello stesso oggetto da posizioni con illuminazione differente o contro-luce. In questo caso è possibile correggere l'esposizione in fase di post-produzione o di utilizzare in fase di acquisizione valori stabili e medi di esposizione per tutte le immagini.

La qualità dell'immagine non è, ad ogni modo, l'unico fattore in grado di incidere significativamente sull'intero processo di ricostruzione tridimensionale dell'oggetto.

Come già detto, la tecnica fotogrammetrica consente di derivare le coordinate dello spazio oggetto dei punti visibili in almeno due immagini, inserite in un sistema di riferimento nel piano di coordinate immagine. Pianificare l'acquisizione delle immagini è fondamentale, in relazione alle caratteristiche morfologiche ed ambientali dell'oggetto da rilevare. La complessità geometrica e volumetrica del sito, manufatto od oggetto, e le condizioni di accessibilità, visibilità ed illuminazione dell'ambiente condizionano la scelta della modalità di acquisizione dei fotogrammi. La distanza di acquisizione, la posizione e l'orientamento della camera e la quantità di immagini dovrebbero essere pianificati in modo da garantire che, almeno nel più generale caso teorico, l'oggetto venga ripreso nella sua interezza ed occupi gran parte della fotografia (per sfruttarne al massimo la risoluzione e poter estrarre quante più informazioni tridimensionali da ogni immagine). La complessità è, tuttavia, definita soprattutto dalla quantità di piani dominanti che lo compongono. La presenza, in genere, di diversi piani di profondità dell'oggetto, porta a prediligere punti di vista obliqui rispetto ai piani principali per acquisire un numero maggiore di informazioni tridimensionali. Possono definirsi dei casi generali e ideali per diversi oggetti. Per quelli di piccola dimensione o manufatti liberi da particolari occlusioni (che consentano l'acquisizione anche a diverse quote), la configurazione ideale per le acquisizioni di diversi piani di profondità è una traiettoria di registrazione degli scatti definita intorno al volume dell'oggetto. Le posizioni e gli orientamenti della camera devono consentire, in questo caso, di coprire l'intero volume spostandosi intorno all'oggetto e ruotando rispetto al suo ideale baricentro.

Nel caso più generale di manufatti definiti da un solo piano dominante, sono codificate due tecniche di ripresa principali, frequentemente utilizzate insieme in una campagna di rilevamento. In una ripresa "ad assi convergenti", viene mantenuta costante la distanza dall'oggetto e le immagini vengono acquisite girando intorno all'oggetto, mirando al suo baricentro e posizionando l'asse di mira a circa 45° rispetto al piano dominante. In questi casi, comunque, è preferibile avere anche immagini scattate in modo parallelo al piano dominante, per garantire una qualità migliore della texture.

In presenza di più piani dominanti, è fondamentale assicurarsi che siano presenti immagini di raccordo tra più blocchi di riprese convergenti. Quando invece si è in presenza di manufatti con un piano dominante e l'obiettivo è la restituzione di un disegno di facciata e non la precisa rappresentazione di tutti i piani di profondità degli elementi decorativi, è preferibile adottare una ripresa "ad assi paralleli", ovvero mantenendo il piano della camera parallelo al piano dominante. Questa tecnica offre

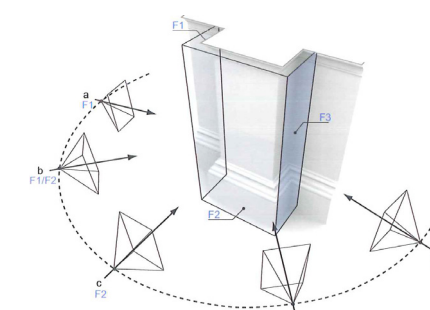


Fig. 4.2.3. Schema di acquisizione ad assi convergenti.

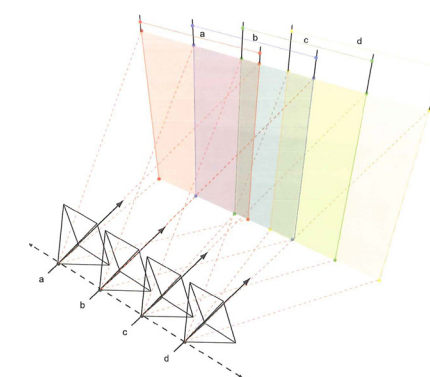


Fig. 4.2.4. Schema di acquisizione ad assi paralleli.

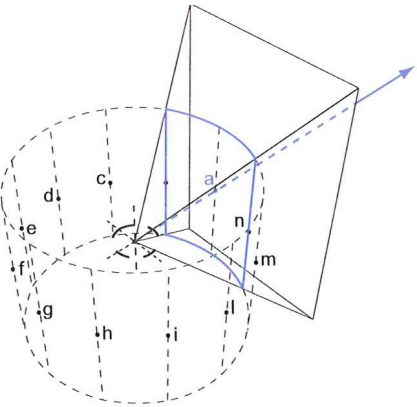


Fig. 4.2.5. Ripresa fotografica cilindrica.

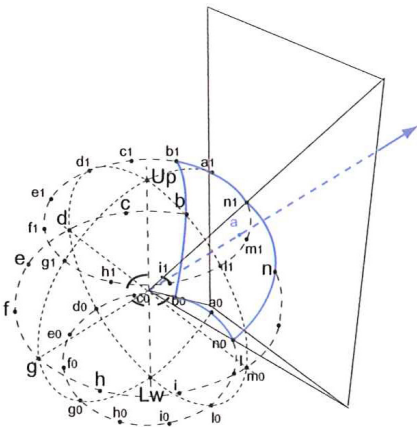


Fig. 4.2.6. Ripresa fotografica sferica.

L'orientamento ideale per l'estrazione delle texture, ma va ad ogni modo sempre associata a delle riprese ad assi convergenti. L'ultima tecnica di acquisizione, per la restituzione di informazioni spaziali è la “ripresa panoramica”. Questa tecnica permette l'acquisizione di informazioni spaziali da una sola posizione, restituite poi su uno sviluppo panoramico. Per questo tipo di ripresa è indispensabile l'utilizzo di un treppiedi e una testa panoramica. Nonostante in commercio siano ormai disponibili diversi modelli (alcuni per foto panoramiche ed altre per foto sferiche, che consentono la rotazione solo sull'asse orizzontale o sui due assi), le più diffuse hanno tutte caratteristiche comuni. Una testa panoramica è in genere dotata di una rondella che consente di selezionare l'angolo di rotazione e, dunque, il numero di scatti in base alla lunghezza focale e l'angolo di campo dell'obiettivo utilizzato. Alcune piastre a slitta permettono il preciso posizionamento del punto nodale della camera, attorno al quale avviene la rotazione durante le riprese. Questo consente di evitare errori di parallasse che potrebbero impedire l'allineamento e lo *stitching* delle immagini. Una manopola consente la rotazione della camera sull'asse verticale ed un'altra slitta permette di posizionare il centro della camera in asse con il centro del treppiedi.

Oltre alla tecnica di ripresa, particolare cura deve essere posta per la determinazione della distanza dall'oggetto per le acquisizioni fotografiche e la sovrapposizione tra le immagini, stimate in funzione della risoluzione finale scelta per il rilievo. In generale, definendo B la linea di base tra due immagini e D la distanza media da fotocamera a oggetto, il rapporto B/D (base-profondità) deve essere ponderato in modo da garantire una forte configurazione geometrica e una ricostruzione meno sensibile al rumore e alla misurazione errori. Un valore tipico del rapporto B/D nella fotogrammetria terrestre dovrebbe essere intorno a 0.5, anche se in situazioni pratiche è spesso molto difficile soddisfare questo requisito. In linea di principio, maggiore è la base di presa, più accurate risulteranno le coordinate dell'oggetto. Allo stesso tempo però, una base di presa molto larga potrebbe creare problemi nell'estrazione automatica dei punti omologhi, a causa di forti effetti prospettici, considerando anche che l'accuratezza del sistema aumenta all'aumentare delle immagini in cui un punto appare.

4.2.3 Calibrazione geometrica della camera e orientamento dei fotogrammi

Principi teorici, acquisizione ed elaborazione dei dati

La calibrazione della fotocamera e l'orientamento dell'immagine, sebbene concettualmente equivalenti, sono procedure di fatto diversificate. La calibrazione geometrica della camera¹⁶ determina i parametri interni mentre la procedura di orientamento dell'immagine stima i parametri esterni. In fotogrammetria, le due strategie sono spesso separate laddove un dataset di immagini, ottimale per la calibrazione della fotocamera, non è allo stesso modo soddisfacente per l'orientamento dei fotogrammi. Esistono però altri approcci che fondono la determinazione dei parametri interni ed esterni, usando lo stesso gruppo di fotografie e procedure, ma i risultati sono normalmente scadenti e poco accurati.

La **calibrazione geometrica** di una fotocamera è definita come la determinazione del discostamento della realtà fisica rispetto ad un sistema, geometricamente ideale, basato sul principio prospettico della collinearità. Tali deviazioni sono da intendersi come errori sistematici riscontrati nei fotogrammi e causati delle distorsioni ottiche¹⁷. Il metodo più efficace per eseguire la calibrazione geometrica è il “modello fisico” sviluppato da Brown¹⁸ per il quale, secondo i principi della fotogrammetria, una camera è considerata calibrata se la sua lunghezza focale, il punto principale e un insieme di Parametri Aggiuntivi - Aps, connessi alle distorsioni, sono noti. Pertanto, il modello fisico consente di esprimere le correzioni Δx e Δy da applicare alle coordinate immagine come

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\Delta x_0 + \frac{\bar{x}}{f} \Delta f + \bar{x} S_x + \bar{y} a + \bar{x} r^2 k_1 + \bar{x} r^4 k_2 + \bar{x} r^6 k_3 \\ &\quad + 2P_1 \bar{x} \bar{y} + (2x^{-2} + r^2) P_1 + 2\bar{x} \bar{y} P_2 \\ \Delta y &= -\Delta y_0 + \frac{\bar{y}}{f} \Delta f + \bar{x} a + \bar{y} a + \bar{y} r^2 k_1 + \bar{y} r^4 k_2 + \bar{y} r^6 k_3 \\ &\quad + 2P_1 \bar{x} \bar{y} + (2y^{-2} + r^2) P_2\end{aligned}\quad (4.13)$$

in cui:
 $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f$, sono gli elementi di correzione dei parametri di orientamento interno;
 K_i , rappresentano i parametri di distorsione radiale;
 P_i , costituiscono i parametri di *decentering distortion*;
 S_x , definisce un fattore di scala in x, per compensare eventuali pixel non quadrati;
 a , è il fattore di taglio - *shear factor* - per deformazioni geometriche e di non ortogonalità dei pixel.

Il sistema espresso in 4.13 implica che per la sua risoluzione vengano scritte un numero di equazioni sovrabbondanti da risolvere in maniera iterativa,

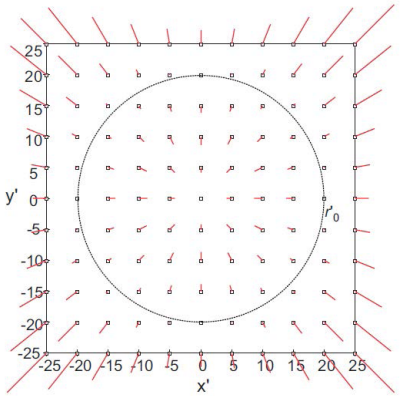


Fig. 4.2.7. Effetti della distorsione radiale..

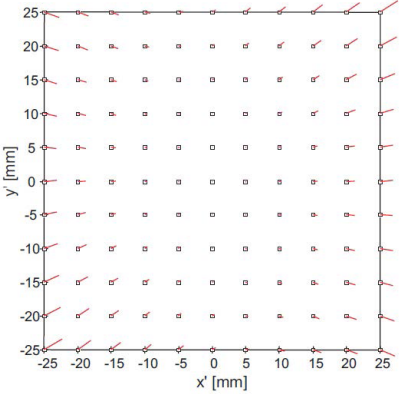


Fig. 4.2.8. Effetti della decentring distortion.

minimizzando lo scostamento tra la soluzione approssimata e quella esatta. Esistono, d'altra parte, alcune regole pratiche per facilitare ed ottimizzare la calibrazione da eseguirsi in fase di acquisizione delle immagini: scattare fotografie posizionando nella scena un discreto numero di target circolari, misurandone la posizione con strumenti diversi (ad es. un teodolite), facilmente riconoscibili nelle immagini; in alternativa, posizione pannelli con stampate matrici di punti a cui poter attribuire valori noti. La procedura di calibrazione può, inoltre, essere attuata tramite appositi software in commercio¹⁹, che permettono di stimare i parametri interni della camera con procedure automatiche di *Test Field Calibration*, computando una serie di immagini scattate ad una griglia di test.

La procedura di **orientamento dei fotogrammi** viene eseguita per determinare la posizione e inclinazione (in riferimento ai valori angolari rispetto ad una terna di assi cartesiani) in cui sono state acquisite le immagini. Note le fotografie e i parametri di calibrazione, una serie di punti omologhi è identificata sulle stesse con procedure manuali o automatiche. È buona norma considerare almeno 5 corrispondenze avendo cura che i punti siano ben distribuiti sull'intero formato dell'immagine, non complanari né collineari. Tali osservazioni sono utilizzate per costituire il sistema di equazioni di collinearità (4.11), iterativamente risolto con il modello di Gauss-Markov dei minimi quadrati (4.12) al fine di ricavare i parametri di orientamento esterno ricercati.

4.2.4 Estrazione delle misure 3D, generazione del modello poligonale e texturizzazione

Noti i parametri della camera, le corrispondenze misurate sulle immagini bidimensionali sono convertite in coordinate oggetto tridimensionali, univoche, utilizzando il principio di collinearità e i parametri interni ed esterni precedentemente recuperati. Ne deriva una nuvola di punti, sparsa o densa, rappresentativa delle principali geometrie e discontinuità dell'oggetto rilevato. Risulta, quindi, evidente che rispetto al flusso di lavoro descritto per i sensori ottici attivi (par. 4.1.3), la differenza principale risiede nella derivazione della nuvola di punti 3D: mentre i sensori di distanza (ad esempio gli scanner laser) forniscono direttamente l'informazione tridimensionale, la tecnica fotogrammetria richiede l'elaborazione matematica dei dati dell'immagine per ricavare una nuvola di punti 3D utile per ricostruire digitalmente la scena rilevata.

Dalla nuvola è possibile generare un modello poligonale con protocolli di *meshing* diversificati a seconda dei dati di input.

In caso di nuvole di punti sparse, gli elementi poligonali vengono normalmente creati con una procedura interattiva, in primo luogo creando linee, poi poligoni e infine superfici.

In caso di nuvole di punti dense, la generazione del modello varia in relazione all'essere strutturata o meno della nube. In particolare, per le nuvole di punti strutturate il meshing è un passo piuttosto semplice, mentre per quelle non strutturate non è così immediato. Comunemente, viene adottato l'algoritmo di Delaunay (o simile) che prevede la proiezione di tutti i punti tridimensionali su un piano, l'identificazione di quelli con distanza minima ed il loro collegamento. Una volta determinate le connessioni, il set di potenziali triangoli viene riproiettato nello spazio tridimensionale e topologicamente verificato.

Altri approcci più comuni di meshing, ma più complessi della triangolazione di Delanaury, si basano su: (i) interpolazione di superfici, che costruiscono una maglia con più elementi di quelli necessari per poi eliminare i triangoli non coerenti con la superficie; (ii) superfici di approssimazione, in cui l'output deriva da una triangolazione di una funzione di best-fit dei dati grezzi tridimensionali.

Una volta generato il modello poligonale, una rappresentazione fotorealistica dell'oggetto rilevato tridimensionalmente può essere ottenuta attraverso procedure di *texture mapping*. Nel caso di modelli poligonali in cui sono noti i parametri di orientamento della camera, come nel caso di modelli fotogrammetrici con immagini orientate, la procedura di mapping è automatica. Con sensori attivi ed immagini ottenute da sensori separati, invece, è richiesto un processo interattivo. Alcuni punti omologhi tra la mesh tridimensionale e l'immagine bidimensionale devono essere, in questo caso, individuati per stabilire la trasformazione da applicare al fine di attribuire informazioni di colore alla mesh. L'operazione di riconoscimento è manuale laddove, ad oggi, non sono state ancora proposte delle soluzioni commerciali in grado di automatizzare il processo.

Note

1 L'utilizzo della luce laser è dovuto alle sue particolari proprietà, che la rendono in grado di generare spot luminosi anche su distanze molto elevate. Si tratta innanzitutto di una luce monocromatica (formata da un'unica lunghezza d'onda), ma anche coerente (i cui quanti di energia elettromagnetica sono tutti in fase tra loro). Questo significa, in primo luogo, che le lenti ottiche utilizzate possono essere progettate per una sola lunghezza d'onda e risultare in questo modo molto più efficaci. La coerenza

poi della luce consente di canalizzare molta più energia per unità di superficie.

2 Il principio di funzionamento è basato sull’analisi della deformazione della geometria dei pattern, nota a priori, e proiettata sull’oggetto, mettendo in evidenza i cambiamenti della superficie, nel caso in cui questa non risulti piana.

3 Nei sistemi T.O.F., il raggio laser è riflesso da due diversi specchi ortogonali. L’inclinazione dei due specchi stabilisce la direzione del raggio emesso. Oltre a questo movimento, l’intero sistema di scansione ruota e può eventualmente essere integrato con un sistema di traslazione.

4 Esistono ulteriori parametri che influenzano su una scansione tridimensionale. La velocità di acquisizione condiziona la qualità del risultato, pertanto è necessario definirne il valore già in fase di programmazione delle acquisizioni. Il tempo, infatti che si ritiene di aver risparmiato o acquistato durante la fase di scansione non tiene conto dei problemi che potrebbero sopraggiungere durante l’elaborazione dei dati che potrebbero essere restituiti solo parzialmente o al contrario risultare di difficile gestibilità data un’eccessiva ridondanza. Anche la presenza di transazioni cromatiche, che creano salti di quota inesistenti nello spazio oggetto, potrebbe produrre incertezza nella misura. Va inoltre ricordata la traslucidità del materiale da acquisire. L’alone che si genera attorno allo spot, dovuto alla riflessione interna della luce laser, provoca infatti una riduzione della precisione in funzione della risoluzione utilizzata e della dimensione dello spot. La parziale penetrazione poi del raggio all’interno di questi materiali, come ad esempio il marmo, provoca inoltre una variazione dei valori acquisiti in profondità. Infine temperatura, condizioni atmosferiche e radiazioni luminose naturali o artificiali possono influire sulla misura di valori di distanza riducendone l’accuratezza.

5 La “risoluzione orizzontale” è definita dalla frequenza di campionamento spaziale dell’area inquadrata dalla range camera, considerando che per piano orizzontale (xy) si intende il piano ortogonale all’asse ottico. Le risoluzioni in x e y potrebbero coincidere (come avviene ad esempio quasi sempre nei sistemi a proiezione di pattern in cui la range camera ha un pixel quadrato) oppure no (come nel caso in genere dei sistemi a triangolazione). La “risoluzione in profondità” è invece riferita al valore lungo l’asse z. La “risoluzione massima” di una range camera è legata alla diffrazione della luce ed alla generazione di interferenze e divergenze della luce quando questa si trova a passare attraverso una piccola apertura. In particolare, più piccola sarà questa apertura, maggiore sarà questo fenomeno.

6 In alcuni sistemi, come il Trimble Indoor Mobile Mapping Solutions - TIMMS, il iMS3D della Viametris o il Leica ProScan, i diversi componenti sono montati su dei carrelli. In questi casi, l’acquisizione è piuttosto problematica in caso di ambienti particolarmente stretti o in presenza di salti di quota. Ulteriori sistemi, invece, sfruttano il posizionamento di tutte o alcune componenti su zaini, rendendo più agevole la fase di acquisizione di dati tridimensionali camminando all’interno delle strutture, come il Leica Pegasus, lo Zeb1 e Zeb- Revo della Geoslam.

7 A queste si può aggiungere come ulteriore anomalia riscontrabile dopo la generazione del modello poligonale, la presenza di rumore.

8 Abdel-Azis, Y.I. e Karara, H.M., “Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry”, Proceedings

of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1971. Pp. 1-18.

9 Tsai, R.Y., “An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision”, Proceedings CVPR, 1986. Pp. 364-374.

10 Una distinzione tipologica, tra le textures utilizzabili per il fotorealismo di un modello poligonale, può essere effettuata tra texture ripetibili e texture ad hoc. Le prime sono applicate in maniera ripetitiva sulla superficie dell’oggetto e possiedono caratteristiche tali da consentire la loro visualizzazione senza giunture (seamless). La ripetibilità di queste immagini senza limiti non impone problemi di risoluzione. Nelle texture ad hoc, invece, ogni parte è strettamente connessa alle caratteristiche e alle variazioni geometriche del modello. Ne consegue che il risultato è, in questo caso, vincolato alla risoluzione delle stesse immagini.

11 Per stabilire la posizione di un punto dell’oggetto nello spazio, a partire dalle sue coordinate sul piano dell’immagine, ciascun fotogramma è orientato nello spazio in modo da identificare la retta di collinearità associata al punto in questione. L’orientamento delle immagini, in questo caso di tipo esterno, è definito da sei parametri, tre traslazioni e tre rotazioni, per determinare i quali è costruita una matrice matematica.

12 L’orientamento interno definisce il modello geometrico interno della camera. In particolare, i parametri di calcolo sono la posizione del centro della prospettiva O’ riferito al sistema di coordinate immagine, la distanza principale c tra il piano dell’immagine ed il centro della prospettiva e la sua divergenza, causata dalle distorsioni dell’immagine, rispetto ad una proiezione centrale ideale. Questi parametri vengono stimati nella procedura di calibrazione geometrica della camera.

13 I parametri di orientamento esterno esprimono la posizione spaziale e l’orientamento della camera in un sistema di riferimento globale. In particolare, la posizione del centro della prospettiva O’ e tre angoli di rotazione definiscono l’orientamento del sistema di coordinate immagine rispetto ad un sistema globale. Questi parametri vengono indirettamente calcolati, una volta misurate le coordinate dei punti dell’oggetto ben identificabili in un sistema fisso di coordinate globali. La lunghezza del vettore direzione è infatti inizialmente sconosciuta ed ogni punto nello spazio oggetto che giace sulla stessa linea di questo vettore genera lo stesso punto nel sistema immagine. Ogni punto dello spazio oggetto può dunque essere univocamente determinato nello spazio immagine solo intersecando il raggio con una seconda direzione spaziale od un piano.

14 Le immagini digitali sono costituite da matrici bidimensionali, ovvero righe e colonne che identificano la radiometria dei pixels corrispondenti (picture elements). Ogni pixel è univocamente definito da due numeri interi ed indicati in genere con le lettere “u” e “v”, che rappresentano la posizione riga (“u”) e colonna (“v”) all’interno della matrice. Per convenzione, l’origine di questo sistema è localizzato in alto a sinistra dell’immagine digitale, con l’asse x parallelo al lato superiore ed orientato verso destra e l’asse y parallelo al lato sinistro ed orientato verso il basso.

15 De Luca, L., La fotomodellazione architettonica, Dario Flaccovio Editore, 2011.

16 La procedura di calibrazione della telecamera è suddivisa in calibrazione geometrica e radiometrica. In questa sede è considerata la sola calibrazione geometrica.

17 Esistono differenti tipologie di distorsione, legate all’aumentare della distanza dell’oggetto dall’asse ottico della camera.

La distorsione radiale è lo spostamento di un punto sull'immagine dalla sua posizione ideale e corrisponde ad una variazione dell'angolo tra il raggio e l'asse ottico. Espressa come $\Delta r'$, la distorsione radiale dipende da tre parametri K_i , correlati principalmente alle aberrazioni delle lenti, e può essere positiva (a “cuscino”) oppure negativa (a “barile”). È generata da tutti gli obiettivi fotografici, anche se in misura diversa. Gli obiettivi che distorcono meno sono i cosiddetti normali (con angolo di campo di circa 55-60°). Agli obiettivi grandangolari (con angoli di campo maggiori) sono legate distorsioni tipicamente negative, mentre ai teleobiettivi (con angoli di campo inferiori) quelle positive. La decentering distortion, dipendente da parametri P_i , correlati alle coordinate del punto principale del fotogramma, è dovuta ad un difetto nell'allineamento dei gruppi ottici. È molto frequente negli obiettivi commerciali con messa a fuoco non fissa o con zoom ed è in genere di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla distorsione radiale.

18 Brown, D.C., “Close-range camera calibration”, PE&RS, 1971, 37(8). Pp.855-866.

19 PhotoModeler e Agisoft Lens, per citarne alcuni.

CAPITOLO QUINTO

Processi e metodi di strutturazione semantica di
modelli architettonici in una visione integrata
per la loro gestione in archivi digitali

5.1 Algoritmi di semplificazione poligonale

La complessità dei modelli - misurata dal numero di poligoni - che è possibile ottenere con le procedure di rilievo e modellazione indicate nel capitolo 4, sembra crescere più velocemente della capacità degli hardware grafici di manipolarli in modo interattivo nonché delle possibilità delle banche di dati di archivarli e gestirli. Spingere l’acquisizione geometrica verso livelli estremi di dettaglio e accuratezza indiscriminati non ha senso se determina modelli che risultano, a causa del considerevole numero di poligoni che li costituisce, praticamente ingestibili dai software e dal web per la loro pesantezza. In pratica, il numero di poligoni che vogliamo sembra sempre superare il numero di poligoni che possiamo permetterci. Per rispondere a questo problema, sono stati formalizzati negli anni numerosi approcci di semplificazione. La letteratura è piena di eccellenti algoritmi riduttivi, proposti dai ricercatori, ciascuno con punti di forza e debolezza. Per comprenderne le caratteristiche, è utile definire prioritariamente i temi di base del processo di semplificazione di una mesh.

5.1.1 Questioni di base

- **Dichiarazione del problema**
Formalmente, una mesh è una coppia

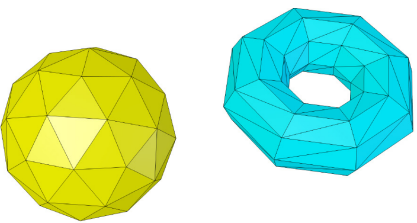


Fig. 5.1.1. Esempio di mesh con genere 0 (la sfera) e genere 1 (la ciambella).

$$M=(V; F) \tag{5.10}$$

dove:
 V , è un insieme di coordinate di input, ad esempio le posizioni $(x;y;z)$;
 F , è un insieme di facce, ad esempio le informazioni sulla connessione dei vertici dei triangoli.

La sua semplificazione implica l'adozione di uno dei due approcci generali:

$$M = (V; F) \rightarrow M' = (V'; F') \tag{5.11}$$

- in cui:
1. $|V'| = n < |V|$ e $||M - M'||$ è minimizzato
 2. $||M - M'|| < E$ e $|V'|$ è minimizzato

L'approccio 1. si pone l'obiettivo di minimizzare l'errore tra la mesh originale e la mesh semplificata quando viene fornito un vincolo di dimensione n per la mesh semplificata.
Corrispondentemente, la seconda impostazione, 2., utilizza un valore di errore di distanza E per ridurre al minimo la dimensione della maglia in modo tale che nessun punto della mesh semplificata sia più lontano della distanza E dal modello di partenza¹.

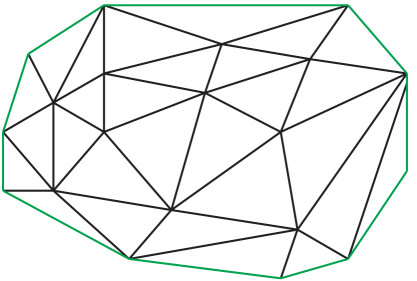


Fig. 5.1.2. Esempio di mesh 2D manifold.

• Topologia

Nel contesto della semplificazione poligonale, la **topologia** si riferisce alla struttura della mesh poligonale considerata e ha due significati.
La *topologia locale* si riferisce alla connettività nel suo contesto spaziale, di una faccia, di un bordo o di un vertice. In altre parole, è la struttura geometrica che circonda una particolare faccia o vertice. La *topologia globale* definisce, invece, la struttura geometrica dell'intera maglia poligonale.
Il *genere* è il numero di fori presente nella superficie della mesh. Ad esempio, una sfera e un cubo hanno un genere pari a zero, mentre una ciambella e una tazza di caffè hanno un genere pari a uno.

Si dice che la mesh è *2D manifold* se la topologia locale è ovunque equivalente a un disco, ovvero se l'area circostante di ogni feature è costituita da un anello di poligoni collegati che forma una singola superficie. In una maglia triangolare che mostra una topologia manifold, esattamente due triangoli condividono ogni spigolo e ogni triangolo condivide un bordo con esattamente tre triangoli vicini.

Una mesh 2D manifold definita da un contorno esterno presenta spigoli che determinano il suo perimetro ossia una catena di spigoli adiacenti, ciascuno appartenente a un solo triangolo e tale che ogni vertice del bordo

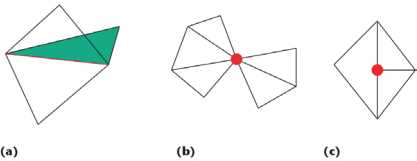


Fig. 5.1.3. Esempi di meshes non-manifold: (a) un bordo condiviso da tre triangoli, (b) un vertice condiviso da due insiemi di triangoli altrimenti non connessi, e (c) un vertice T.

è circondato da un ciclo incompleto di triangoli.
Una maglia che non soddisfa le proprietà di cui sopra, ha una topologia *non-manifold*.
Un buon modello poligonale dovrebbe essere topologicamente manifold. Sfortunatamente, nella pratica, molte superfici non riescono a rispettare queste caratteristiche presentando problemi topologici come giunzioni a T, vertici o spigoli non manifold.

Il trattamento della topologia della mesh durante il processo di semplificazione fornisce una prima importante distinzione tra gli algoritmi. Un algoritmo di semplificazione che preserva la topologia tutela, in ogni fase, la connettività. Tali algoritmi non chiudono i buchi nella mesh preservando, quindi, il genere della maglia. Poiché nessun foro appare o scompare durante la semplificazione, la fedeltà visiva dell'oggetto semplificato tende ad essere relativamente buona. Questo vincolo, tuttavia, limita il livello di semplificazione possibile, poiché gli oggetti con un genere elevato non possono essere semplificati sotto un certo numero di poligoni senza che vengano creati fori di chiusura nel modello. Inoltre, un approccio che preserva la topologia richiede che la mesh di partenza sia manifold. Alcuni algoritmi sono tolleranti rispetto alla topologia: ignorano le regioni della mesh con topologia locale non manifold, lasciando tali regioni non semplificate. Altri algoritmi, al contrario, di fronte a regioni non manifold, possono semplicemente fallire.

Gli algoritmi di modifica della topologia non conservano, con evidenza, necessariamente la topologia manifold. Gli algoritmi possono quindi chiudere buchi nel modello e aggregare oggetti separati in gruppi man mano che la semplificazione procede, consentendo una semplificazione drastica, ben oltre le possibilità raggiunte dagli schemi di conservazione della topologia. Il rovescio della medaglia è che questa drastica semplificazione spesso si presenta al prezzo di una scarsa fedeltà visiva, con artefatti che fanno distogliere lo spettatore. Alcuni di questi algoritmi tentano di regolare, nel corso del processo di semplificazione, il cambiamento nella topologia, ma la maggior parte sono insensibili alla stessa, senza prestare attenzione alla connettività iniziale della mesh.

Di norma, gli algoritmi di conservazione della topologia sono la soluzione preferibile quando la fedeltà visiva è cruciale o in applicazioni come l'analisi ad elementi finiti, in cui la topologia di superficie può influenzare i risultati. Di contro, la visualizzazione in tempo reale di scene complesse richiede una drastica semplificazione e qui gli algoritmi di modifica della topologia sono più vantaggiosi.

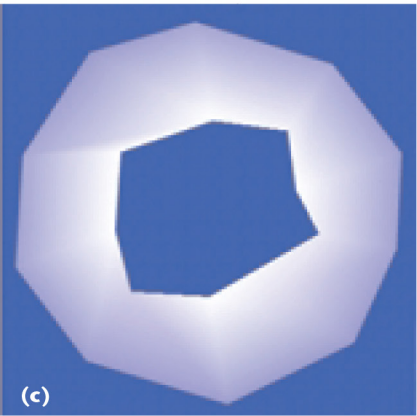
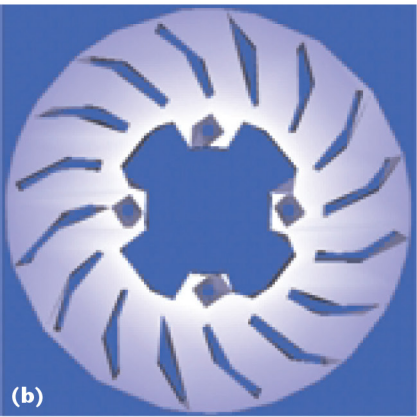
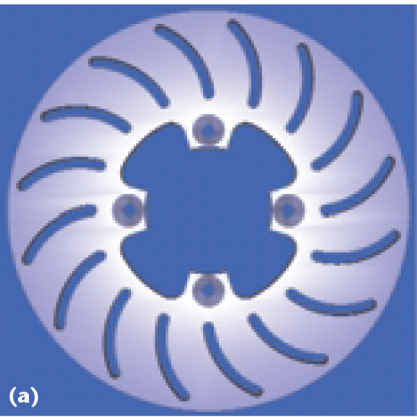


Fig. 5.1.4. Preservare il genere limita drasticamente la semplificazione. Il modello originale di un rotore del freno con (a) 4.736 triangoli e 21 buchi è semplificato con un algoritmo che preserva la topologia utilizzando (b) 1.006 triangoli e 21 buchi e un algoritmo di modifica della topologia con (c) 46 triangoli e un buco (modello del progetto Alpha_1, University of Utah).

• **Errore di approssimazione e sua misurazione**

L'errore di approssimazione - *approximation error* - indica la deviazione tra la mesh originale e la maglia semplificata.

Misurare tale errore è una parte cruciale della maggior parte dei metodi di semplificazione. La misura viene utilizzata, ad esempio, per guidare il processo di semplificazione o per terminarlo quando l'errore di approssimazione supera un determinato valore di soglia.

In letteratura, esistono diversi modi per gestire l'errore di approssimazione²:

- può essere considerato localmente, cioè l'accuratezza dell'approssimazione è nota attorno a ciascuna entità superficiale;
- può essere valutato globalmente, cioè l'accuratezza dell'approssimazione è nota solo per l'intera mesh semplificata.
- altri criteri (solitamente viene considerata la curvatura per definire un limite globale sulla superficie);
- l'errore di approssimazione non viene valutato e il processo di riduzione è guidato solo da un dato rapporto di semplificazione.

L'errore di approssimazione può essere misurato utilizzando diverse tecniche, dette *error metrics*. Senza pretesa di esaustività, alcune sono elencate di seguito:

- somma delle distanze al quadrato tra i punti campione considerati sulla mesh originale e gli stessi, sulla maglia semplificata³;
- somma delle distanze al quadrato tra un nuovo vertice, dopo un'operazione di compressione del bordo, e le facce adiacenti dei vertici di partenza⁴;
- somma dei volumi tetraedrici al quadrato tra due aree corrispondenti della mesh⁵;
- distanza di Hausdorff⁶;
- somma ponderata per superficie delle distanze al quadrato tra la regione modificata dalla contrazione e la mesh originale⁷.

Le *quadratic error metrics*, di cui si dirà più nel dettaglio nel par. 5.1.2, hanno guadagnato notevole popolarità. Il metodo caratterizza l'errore di semplificazione di un determinato vertice della mesh, associando allo stesso una matrice 4 x 4. Il vantaggio della tecnica è che sono necessarie solo operazioni aritmetiche piuttosto semplici per aggiornare le matrici nel corso della procedura di semplificazione.

• **Logiche di approccio al processo di semplificazione**

L'approccio tradizionale con la semplificazione poligonale è legato ai tempi di renderizzazione dei modelli. Al fine di accelerare il rendering, si predilige realizzare per il medesimo oggetto, modelli con livelli di dettaglio - LODs - via via sempre più semplificati. Per i modelli dislocati più lontano nella scena, vengono utilizzati LODs più grezzi, riducendo così il numero di poligoni e la velocità di rendering aumenta. Poiché i LODs vengono calcolati offline nella fase di preelaborazione, questo approccio è definito **static polygonal simplification**. La semplificazione statica ha molti vantaggi. Disaccoppiare la semplificazione e il rendering rende questo il modello più semplice da utilizzare poiché l'algoritmo di semplificazione genera LODs, indipendentemente dai vincoli di rendering in tempo reale, e l'algoritmo di rendering sceglie semplicemente i LODs più appropriati per rappresentare l'oggetto da renderizzare.

La **dynamic polygonal simplification** si allontana dall'approccio statico tradizionale. Considerando che in una semplificazione statica, l'algoritmo crea singoli LODs durante la fase di preelaborazione, un sistema di semplificazione dinamica crea una struttura di dati che codifica uno spettro continuo di dettagli. Il LOD desiderato può essere estratto da questa struttura in fase di esecuzione. Uno dei principali vantaggi di questo approccio è la granularità migliore. Poiché l'algoritmo specifica esattamente il LOD per ogni oggetto, piuttosto che scegliere tra poche opzioni pre-elaborate, non vengono utilizzati più poligoni del necessario, rendendo la memoria più libera per impiegare altri poligoni per il rendering di altri oggetti. Una migliore granularità porta quindi a un migliore utilizzo delle risorse e a una fedeltà generale più elevata per un dato numero di poligoni. La semplificazione dinamica supporta anche la trasmissione progressiva di modelli poligonali, in cui viene trasmesso un modello di base seguito da un flusso di raffinamenti da integrare dinamicamente⁸.

La **view-dependent simplification** implementa la semplificazione dinamica utilizzando criteri connessi alla visualizzazione per selezionare il LOD più appropriato per la vista corrente. In un sistema dipendente dalla visualizzazione, un singolo oggetto può avere diversi livelli di semplificazione, contemporaneamente. Per esempio, le porzioni più vicine dell'oggetto al punto di vista possono apparire ad una risoluzione più alta rispetto alle parti lontane. O ancora, le regioni che definiscono il profilo di un oggetto possono essere ottenute con una risoluzione maggiore rispetto alle aree interne. Assegnando poligoni laddove necessari, il processo di semplificazione view-dependent ottimizza la distribuzione delle risorse. Un esempio applicativo classico è rappresentato dai modelli dei terreni. La visualizzazione di grandi superfici va ben oltre la capacità di rendering

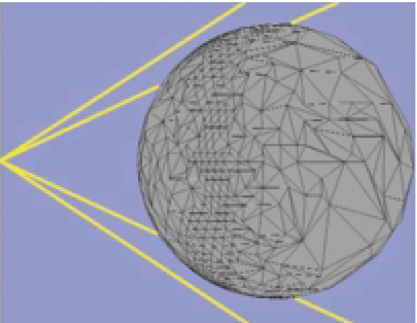
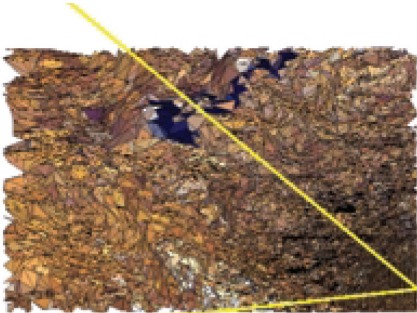


Fig. 5.1.5. Due esempi di semplificazione view-dependent, in relazione al cono ottico di inquadratura, in giallo. Un terreno ad alta risoluzione vicino allo spettatore viene semplificato in modo aggressivo all'aumentare della distanza (a sinistra). Una sfera viene semplificata in modo aggressivo nelle regioni interne e di affioramento, mentre l'alta fedeltà viene preservata lungo la silhouette (a destra).

delle maggiori soluzioni hardware di fascia alta. La creazione di LODs secondo un approccio statico, non aiuta: il punto di vista in genere è abbastanza vicino a una parte del terreno e distante dalle altre, quindi un LOD complessivo alto fornirà una buona fedeltà visiva ma frame rate inaccettabili, mentre un valore di LOD basso fornirà una buona frequenza dei fotogrammi ma una fedeltà terribile. Suddividere il terreno in porzioni più piccole, ottenendo per ciascuna di esse un LOD specifico, risolverebbe entrambe le questioni ma introduce un problema di discontinuità tra i blocchi visualizzata come crepe tra le superfici adiacenti. Un approccio view-dependent offre la soluzione migliore poiché permette di utilizzare un LOD alto per rappresentare la porzione di terreno prossima al punto di vista e un LOD basso per le parti distanti, con una degradazione progressiva dei dettagli.

5.1.2 Tassonomia dei principali algoritmi

I numerosi metodi di semplificazione di una mesh possono essere classificati nelle seguenti categorie:

- *Region merging e vertex clustering.*
Metodi che riducono la quantità di feature della mesh unendole tra loro;
- *Decimation.*
Metodi di decimazione che riducono la quantità di feature della mesh rimuovendole;
- *Re-meshing e Re-tiling.*
Metodi che ricostruiscono una mesh per ottimizzare la sua struttura secondo determinati criteri;
- *Multiresolutional wavelet.*
Metodi che semplificano una mesh utilizzando una maglia di base, scomposta in elementi più piccoli;
- *Image driven.*
Metodi che utilizzano l'aspetto visivo della mesh per guidare la procedura di semplificazione;
- *Neural network based.*
Metodi basati sulla rete neurale per semplificare una maglia poligonale.

L'intento di questa sezione non è quello di fornire un elenco esauriente di tutti i lavori condotti nel campo della semplificazione poligonale, né di selezionarne i migliori, bensì di descrivere brevemente alcuni degli

algoritmi più diffusi.

• **Co-plan region merging**

Gli algoritmi di fusione di regioni complanari riducono il numero di feature di una mesh tramite l'unione di suddette regioni. Il principio di funzionamento ha origine dalla ricerca di facce complanari o quasi complanari, le quali vengono unite in modo da generare poligoni più grandi. I poligoni risultanti sono triangolati a loro volta per generare una rappresentazione semplificata della regione.

Tale tipologia di algoritmi è particolarmente indicata per i modelli che contengono superfici planari di grandi dimensioni, come per esempio muri. Si tratta di superfici che potrebbero contenere un numero eccessivo di poligoni in ragione del processo di triangolazione adottato sulla nuvola di punti. In tal caso, un algoritmo region merging potrebbe non comportare alcun effetto negativo nella resa dell'aspetto visivo della superficie, migliorando notevolmente il modello in termini di pesantezza e quindi di processabilità.

Nella sua forma base, la fusione viene eseguita selezionando due facce adiacenti che sono sufficientemente complanari secondo alcuni criteri che è possibile impostare e, successivamente, procedere con la loro unione. Quindi, i bordi delle facce unite vengono semplificati e le regioni risultanti vengono triangolate.

Il processo è ripetuto in modo iterativo per le facce rimanenti, fino a quando nessuna faccia adiacente alle facce già unite soddisfa una planarità o un determinato valore di errore nel calcolo delle normali.

Un notevole vantaggio di questa categoria di algoritmi è che non cambia la topologia della mesh di partenza e la valutazione dell'errore è intuitiva. Di contro, l'operazione di triangolazione dei poligoni che l'approccio prevede può richiedere molto tempo, il che ne limita l'applicabilità a mesh altamente complesse; a meno che il modello non possa essere considerato come unione di parti separate, per le quali la semplificazione potrebbe essere parallelizzata, consentendo così di elaborare trame più complesse in un tempo ragionevole.

• **Vertex clustering**

Gli algoritmi di raggruppamento di vertici - detti anche *vertex merging* - combinano i vertici attigui di una mesh in cluster, sostituendo poi ciascun cluster con un singolo vertice. Ciò determina la degenerazione di molte facce di una mesh in punti o spigoli.

La procedura può essere condotta in vario modo, ciascuno codificato in un diverso algoritmo formalizzato in letteratura. Alcuni algoritmi di

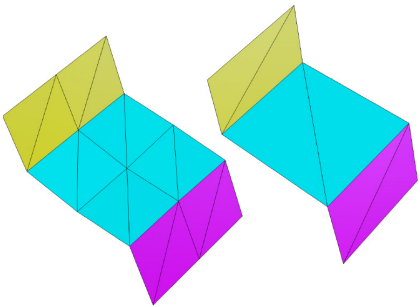


Fig. 5.1.6. Unione di facce quasi complanari.

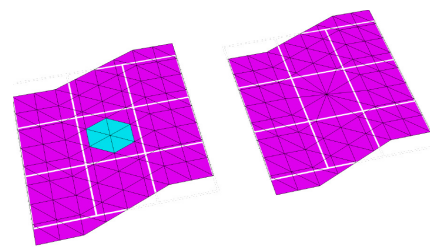


Fig. 5.1.7. Esempio di cluster di vertici bidimensionali.

convergenza dei vertici ricoprono la mesh con una griglia 3D allineata agli assi principali e sostituendo tutti i vertici all'interno di ciascun riquadro della griglia con un singolo vertice. Altri metodi, invece, usano gli *octrees*⁹ al posto di una griglia uniforme in modo tale da adattare la risoluzione del cluster più strettamente alla distribuzione geometrica della mesh originale¹⁰.

Esistono diverse opzioni per calcolare la posizione del vertice 'unito': può essere uno dei vertici originali, una media dei vertici, il centro del cluster o la sua posizione può essere selezionata riducendo al minimo alcune funzioni di errore. La *quadratic error metric* (descritta più nel dettaglio al punto successivo) può essere usata per posizionare il vertice rappresentativo di un cluster in modo da ridurre al minimo l'errore quadratico dello stesso. Tuttavia, l'operazione di clustering non conserva sempre la topologia. Decidere se ciascun vertice in cluster si trova all'interno o all'esterno dell'oggetto richiede che la topologia sia manifold quando le informazioni triangolari vengono rigenerate.

Un altro inconveniente di tale categoria di algoritmi risiede nella difficoltà intrinseca di gestione degli attributi di superficie, come il colore. Ad esempio, se ci sono più triangoli con colori diversi, i colori geometrici semplificati possono apparire notevolmente differenti rispetto alla geometria originale.

Dal momento che le operazioni di convergenza dei vertici spesso elaborano i dati di input in un ordine casuale, questa caratteristica le rende idonee per il processamento di maglie di grandi dimensioni poiché consentono l'implementazione parallela. Nel loro impiego, occorre però considerare che il cluster dei vertici non tiene conto delle caratteristiche geometriche locali come, ad esempio, i bordi affilati. Ciò limita l'utilità del clustering. Un'alternativa per alleviare questo problema è usare la relazione di adiacenza di tutti i punti e calcolare le normali a ciascun vertice. Questa informazione può quindi essere utilizzata per guidare una suddivisione spaziale adattativa fino a quando gli angoli tra le normali in un cluster sono al di sotto di una certa soglia.

Un'altra soluzione è usare un approccio che considera il peso dei vertici. I pesi possono essere calcolati per rappresentare, ad esempio, un'importanza visiva di ciascun vertice e questa informazione può essere utilizzata per regolare il processo di cluster dei vertici. L'algoritmo di Rossignac-Borrel¹¹, il primo proposto di questa tipologia, inizia il processo di convergenza dei vertici assegnando una importanza a ciascun vertice. Vertici associati a facce grandi e/o caratterizzati da alta curvatura sono considerati più importanti di quelli collegati a facce di dimensioni più contenute e/o con curvatura bassa. Successivamente, l'algoritmo sovrappone una griglia 3D

sul modello e collassa tutti i vertici all'interno di ciascuna cella della griglia sul singolo vertice più importante, rientrando nel confine della cella stessa. Una variazione dell'algoritmo è stata introdotta da Low e Tan¹². La loro tecnica, detta *floating-cell*, è basata su celle mobili, di dimensioni specificate dall'utente, le quali si centrano sul vertice cui è assegnata l'importanza maggiore. L'algoritmo collassa tutti i vertici che cadono all'interno della cella verso il vertice rappresentativo che diventa il centro della cella successiva e il processo si ripete in modo iterativo.

(i) Quadratic error metrics.

Questo algoritmo di vertex merging, introdotto da Garland e Heckbert, è forse il migliore in termini di equilibrio tra velocità, fedeltà e robustezza. L'algoritmo procede per fusione iterativa di coppie di vertici, siano essi collegati da uno spigolo che separati da una soglia di distanza t specificata dall'utente. Il principale contributo dell'algoritmo è un nuovo modo di rappresentare l'errore introdotto da una sequenza di operazioni di unione dei vertici, chiamata appunto "quadratic error metric". Come anticipato in precedenza, si tratta di una matrice 4×4 che rappresenta la somma delle distanze al quadrato dal vertice ai piani dei triangoli vicini. Poiché la matrice è simmetrica, il calcolo matematico è estremamente semplificato. L'errore introdotto da un'operazione di unione di vertici può essere rapidamente derivato dalla somma degli errori quadratici dei vertici in fase di unione e tale somma diventerà il valore di errore quadratico del vertice unito. All'inizio dell'algoritmo, tutte le coppie di vertici candidati per il processo di semplificazione, vengono ordinate in una lista di priorità in base all'errore calcolato per unirle. L'algoritmo rimuove la coppia di vertici con l'errore di fusione più basso a partire dall'alto della lista e procede con l'unione. Quindi aggiorna gli errori di tutte le coppie di vertici uniti e ripete il processo.

Il modello è estremamente veloce. Inoltre, la fedeltà visiva delle semplificazioni risultanti tende ad essere piuttosto elevata, anche a livelli drastici di semplificazione.

(ii) Hierarchical dynamic simplification.

Nella categoria degli algoritmi di vertex clustering, rientra l'approccio di Luebke ed Erikson, noto come *hierarchical dynamic simplification HDS*.

Il modello, basato sulla semplificazione dinamica in relazione al punto di vista, parte dal presupposto di non rappresentare un modello come una raccolta di LODs diversi, bensì l'intero modello è una unica struttura di dati di grandi dimensioni. Questa struttura è un albero di vertici ossia una gerarchia di cluster di vertici sottoposti a semplificazione per convergenza

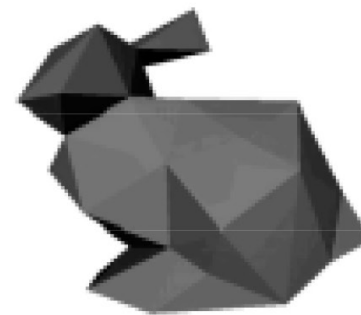
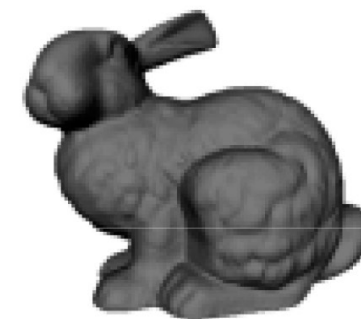


Fig. 5.1.8. Tre livelli di dettaglio ottenuti utilizzando il metodo di Garland e Heckbert. In basso, è schematizzata l'interpretazione geometrica della matrice associata ai vertici.

in modo dinamico. Quando il punto di vista è vicino ad una porzione del modello, i relativi nodi dell'albero dei vertici si dispiegano nei loro nodi di figli costituenti, introducendo nuovi vertici e triangoli. Le ragioni più lontane invece, sono regolate da nodi che 'collassano' nei nodi genitori, unendo i vertici e rimuovendo alcuni triangoli.

La costruzione dell'albero gerarchico non tiene in considerazione la connettività tra i triangoli pertanto questo algoritmo non richiede né conserva la topologia manifold. Inoltre, la fedeltà visiva delle semplificazioni risultanti tende ad essere inferiore a quella ottenuta con algoritmi più accurati.

(iii) Voxel-based.

Un miglioramento dell'algoritmo di Rossignac e Borrel è stato codificato da He, et al., in un approccio di semplificazione di un oggetto basata sui voxel¹³. Si tratta di un tentativo di semplificare la topologia in modo graduale e controllato utilizzando approcci *signal processing*. L'algoritmo inizia campionando una rappresentazione volumetrica del modello, sovrapponendo una griglia 3D di voxel sulla geometria poligonale. Ad ogni voxel è assegnato un valore di 1 o 0, a seconda che il punto di campionamento di quel voxel si trovi all'interno o all'esterno dell'oggetto. Successivamente, l'algoritmo applica un filtro e ricampiona il volume ottenendo un'altra rappresentazione volumetrica dell'oggetto con una risoluzione più bassa. La teoria del campionamento garantisce che le componenti caratteristiche della mesh di dimensioni più piccole e ad alta frequenza vengano eliminate nel volume filtrato.

Sfortunatamente, i dettagli ad alta frequenza come spigoli vivi e angoli squadrati sembrano contribuire notevolmente alla percezione della forma. Di conseguenza, l'algoritmo di semplificazione basato su voxel si comporta male su modelli con tali caratteristiche. Inoltre, l'algoritmo non è non preserva la topologia, dal momento che decidere se i punti di campionamento si trovano all'interno o all'esterno dell'oggetto richiede oggetti a maglie chiuse ben definiti con una topologia manifold.

• Decimation

I metodi di decimazione si caratterizzano per la rimozione iterativa per collasso di spigoli, vertici o facce di una maglia poligonale, fino al soddisfacimento di criteri finali, come il superamento di un valore limite dell'errore di approssimazione specificato dall'utente.

(i) Vertex decimation.

I metodi di decimazione dei vertici semplificano le mesh rimuovendo i

vertici da esse. Solitamente gestiscono i vertici uno per uno e ri-triangolano il foro risultante dopo ogni operazione di rimozione¹⁴.

La presente categoria di algoritmi li differenzia tra loro tipicamente in riferimento a due aspetti: nell'ordine in cui i vertici vengono rimossi e nella strategia di re-triangolazione dei fori risultanti. La planarità, la curvatura¹⁵, la distanza dalla maglia originale¹⁶ o la distanza dal piano medio definito dai vertici vicini guidano la selezione dei vertici da rimuovere e la successiva ritriangolazione.

(ii) Edge collapse.

I metodi di collasso degli spigoli semplificano le mesh rimuovendoli dalle stesse, processandoli uno per uno. Il bordo rimosso viene sostituito da un singolo vertice.

Analogamente a quanto avviene per gli algoritmi di decimazione dei vertici, anche questa categoria ricomprende metodi che differiscono tra loro principalmente per l'ordine di elaborazione degli spigoli e nella collocazione del nuovo vertice. Il nuovo vertice può essere uno dei punti di estremità dello spigolo di partenza¹⁷, il centro del bordo collassato¹⁸, un punto arbitrario lungo lo spigolo collassato¹⁹, o un punto arbitrario selezionato in prossimità del bordo rimosso²⁰.

Una implementazione del metodo è definita dalle cosiddette *progressive meshes*²¹. Una mesh progressiva interpreta un modello poligonale come una sequenza di operazioni di collasso degli spigoli. Si tratta di un algoritmo che rientra nella categoria degli approcci *energy function* per la misura della qualità di una maglia poligonale semplificata²². La riduzione della mesh viene iterativamente ottenuta eseguendo una serie di operazioni sugli spigoli: collasso, scambio o divisione (in questo ultimo caso, un nuovo vertice viene inserito nello spigolo e due nuovi spigoli lo collegano ai vertici più vicini nella regione frontale). La selezione delle operazioni è guidata da un processo di ottimizzazione della 'funzione energetica'. Ad ogni passo, l'elemento la cui eliminazione comporta un aumento più contenuto nella funziona di energia, viene cancellato. Nella mesh progressiva. La semplificazione è gestita con sole operazioni di collasso degli spigoli.

(iii) Triangle decimation.

I metodi di compressione del triangolo semplificano le mesh rimuovendo interi triangoli da esse. La decimazione del triangolo può anche essere vista come una versione grossolana della decimazione degli spigoli perché tutti e tre i bordi del triangolo rimosso degenerano in un singolo vertice e quindi l'operazione è uguale a tre operazioni simultanee di collasso del bordo.

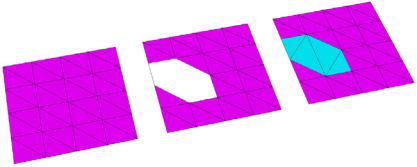


Fig. 5.1.9. Un esempio di rimozione dei vertici e re-triangolazione dei fori.

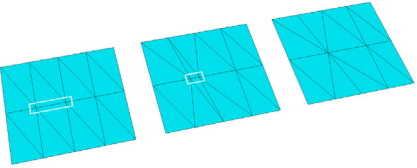


Fig. 5.2.0. Esemplificazione di un algoritmo di decimazione degli spigoli.

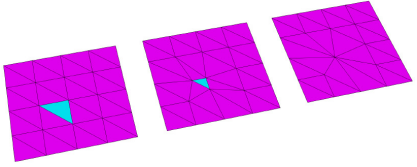


Fig. 5.2.1. Un esempio di decimazione di triangoli.

Un tal tipo di operazione comporta che tre triangoli adiacenti degenerano in spigoli e un totale di quattro triangoli vengono eliminati dalla mesh. Il vantaggio di tale tipologia di algoritmi è che la semplificazione progredisce rapidamente, ma sfortunatamente anche l'errore di approssimazione cresce in maniera altrettanto speditiva.

Il primo algoritmo di tale categoria è stato introdotto da Schroeder, et al²³. L'algoritmo opera eseguendo più passaggi su tutti i vertici del modello. Durante una prima fase, considera l'eliminazione di ciascun vertice. Se il vertice può essere rimosso senza violare la topologia locale del proprio intorno e se la superficie risultante si trova all'interno di una distanza specificata dall'utente, l'algoritmo elimina il vertice e tutti i triangoli in esso incidenti. L'eliminazione lascia un buco sulla superficie, che viene quindi ritriangolata. Il sistema continua a scorrere i vertici nel modello fino a quando non è in grado di rimuovere altri vertici. Ne consegue che i vertici di un modello semplificato dall'algoritmo di decimazione sono un sottoinsieme dei vertici del modello originale²⁴.

Un criterio di controllo nella selezione dei triangoli da collassare è la valutazione della curvatura locale dei tre bordi e dell'equi-angolarità generale del triangolo. In base a questi parametri, tra un gruppo di triangoli complanari, quello che soddisfa meno le condizioni impostate viene rimosso, la regione selezionata viene nuovamente triangolata e i pesi del triangolo vengono aggiornati²⁵.

I metodi di decimazione dei triangoli possono essere usati simultaneamente con gli algoritmi di collasso degli spigoli attraverso la classificazione dei vertici in base alle loro caratteristiche geometriche locali²⁶. Per cui, le regioni più impegnative sono semplificate applicando le operazioni di compressione dei bordi, mentre le altre sono decimate attraverso la compressione dei triangoli. Inoltre, i metodi quadratic errors possono essere impiegati per valutare l'errore del processo²⁷.

Una estensione del metodo generale di decimazione è proposta dall'approccio noto come *simplification envelops*²⁸ che forza la semplificazione della mesh all'interno di due superfici sfalsate. Tali superfici, che possono essere anche copie della mesh poste a non più di una certa distanza e dalla maglia originale, sono generate seguendo il seguente principio: la mesh più esterna sposta ciascun vertice della mesh di partenza lungo una sua normale ad una distanza ϵ , mentre la maglia interna effettua la medesima operazione per un valore pari - ϵ . Le due maglie non devono auto intersecarsi. Una volta create, le due superfici guidano il processo di semplificazione nella misura in cui la superficie semplificata deve essere mantenuta all'interno degli involucri e tale che non devia mai di più di un

valore ϵ e dalla posizione di partenza. Questo approccio è particolarmente utile in quelle operazioni che richiedono di preservare la topologia e la fedeltà visiva. Aspetti che, di contro, riducono la capacità del sistema di una semplificazione drastica.

• Re-meshing e re-tiling

Gli algoritmi di *re-meshing* sono utilizzati per ricostruire le mesh in modo che il loro aspetto sia preservato anche se le posizioni dei vertici, la densità dei vertici o le informazioni connettive possono significativamente discostarsi dalla maglia originale. Ne consegue che anche la conservazione della topologia non è generalmente garantita.

A onor del vero, le tecniche di re-meshing possono essere utilizzate per la semplificazione della mesh solo in alcuni casi, poichè questa non è la loro principale area di applicazione²⁹.

L'algoritmo di *re-tiling* di Turk trova applicazioni maggiori. Il sistema elabora una mesh triangolare di input distribuendo in modo iterativo un numero predefinito di nuovi punti sulla maglia iniziale in modo da produrre una distribuzione quasi uniforme dei vertici. Quindi i vertici originali vengono cancellati iterativamente per generare una nuova triangolazione con la stessa topologia della superficie originale. Questo processo sostituisce, di fatto, la mesh di input con una mesh più grossolana. Il metodo di solito produce buoni risultati su superfici lisce ma la nitidezza potrebbe essere compromessa dall'introduzione di sfocatura³⁰.

• Image driven

Gli algoritmi di semplificazione basati su immagini utilizzano la qualità percettiva della mesh renderizzata per guidare la procedura semplificativa, sfruttando le proprietà visive in un modo che i metodi basati sulla geometria pura non permettono di fare.

Lo svantaggio tipico di questi algoritmi è la loro elevata complessità computazionale, poiché potrebbero dover renderizzare un modello più volte per ogni passaggio di semplificazione per valutare diverse alternative. Al contrario, il sistema è utile per quei modelli che hanno parti almeno parzialmente nascoste, ad esempio le strutture di supporto di un piano, laddove le parti invisibili possono essere semplificate in modo più aggressivo rispetto a quelle visibili.

In letteratura esistono diversi approcci teorizzati, i quali impiegano come criteri di semplificazione: l'errore quadratico medio minore per il componente di luminanza del colore di una mesh³¹; funzioni di visibilità tra le superfici di un modello semplificato e le telecamere che si trovano su una sfera circostante³²; mappe di importanza visiva³³.

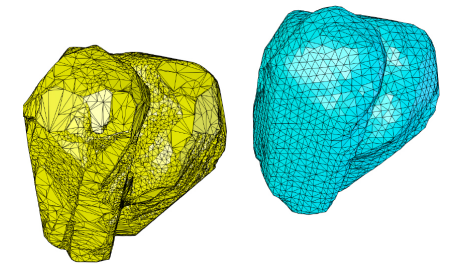


Fig. 5.2.2. Re-meshing.

L'utilizzo di un approccio basato su immagini risolve diversi problemi spinosi nella semplificazione poligonale. La maggior parte degli algoritmi basati sulla geometria che tengono conto degli attributi di superficie come le coordinate di colore usano una ponderazione arbitraria, specificata dall'utente, per determinare l'importanza relativa di preservare questi attributi rispetto alla conservazione della fedeltà geometrica. La valutazione di ciascuna operazione di semplificazione in base al suo effetto su un'immagine renderizzata fornisce un modo diretto e naturale per bilanciare le proprietà geometriche e di ombreggiatura. Lo svantaggio principale dell'approccio è senza dubbio la velocità dell'algoritmo. Nonostante le ottimizzazioni, il processo di riduzione di un modello comprendente decine di migliaia di poligoni a poche centinaia potrebbe richiedere ore³⁴.

- **Neural network based**

La semplificazione della mesh basata su reti neurali è un approccio abbastanza unico. Il principio di base si fonda sull'addestramento di reti neurali per sostituire le forme geometriche locali con forme semplificate predefinite mediante risultati di semplificazione esemplificativi. Il vantaggio principale di tale approccio è che non ha bisogno di lavorare con l'intero oggetto per ridurre la complessità della mesh. L'algoritmo principale afferente alla suddetta categoria è il *Growing Neural Gas* GNG³⁵. È un algoritmo di cluster incrementale non supervisionato in grado di apprendere la topologia triangolare a livello locale e può essere utilizzato per semplificare le mesh. La semplificazione consta di due passaggi: una fase di ottimizzazione e una fase di ricostruzione. La fase di ottimizzazione calcola un insieme semplificato di vertici che fornisce la migliore approssimazione della mesh di partenza in base a dei criteri selezionati. La decisione, se i vertici debbano essere rimossi e il modo in cui le posizioni dei vertici debbano approssimarsi, si basa su un insieme di regole che vengono ottimizzate durante il processo di addestramento iterativo. La fase di ricostruzione utilizza le informazioni sui nuovi vertici forniti dalla fase di ottimizzazione, per generare le facce della mesh semplificata³⁶.

- **Multiresolutional wavelet**

Si tratta di un algoritmo di suddivisione adattiva proposto da Eck, et al, che utilizza una rappresentazione wavelet per guidare il processo. L'analisi multi-risoluzione MRA si basa su una decomposizione della maglia regolare e gerarchica. Fondamentalmente, si tratta di una mesh di base grossolana a cui sono aggiunti o sottratti una serie di dettagli

progressivi codificati, in un processo articolato in due fasi.

La prima fase divide la mesh di input in un numero ridotto di regioni triangolari e genera una mesh di base semplificata per ciascuna regione. Il sistema utilizzato è la triangolazione di Delauney.

La seconda fase parametrizza ogni regione e la suddivide ricorsivamente usando dei wavelet di base. Il processo continua fino a quando la deviazione tra la mesh suddivisa in porzioni e la maglia originale è inferiore a una determinata soglia.

L'algoritmo è piuttosto veloce, consentendo una semplificazione dinamica e la fedeltà delle semplificazioni risultanti è piuttosto elevata per forme regolari e organiche. D'altra parte, possiede gli svantaggi degli approcci più rigorosi che preservano la topologia. Una topologia manifold è assolutamente necessaria nel modello di input e la forma e il genere dell'oggetto originale limitano una potenziale semplificazione drastica.

5.1.3 Alcune considerazioni finali

Nella selezione dell'algoritmo più idoneo per semplificare una maglia poligonale occorre tenere in conto il ruolo svolto nel processo dalla simmetria del modello. Non è insolito che le rappresentazioni digitali di architetture siano costituite da parti anche solo approssimativamente simmetriche. Se la simmetria non viene presa in considerazione nella semplificazione, il risultato può essere visivamente insoddisfacente, ad es. parti simmetriche che presentano fori asimmetrici e irregolari. La consapevolezza della simmetria offre opportunità per una maggiore riduzione della mesh e vantaggi di velocità di rendering³⁷.

La review di letteratura ha messo in evidenza l'esistenza di una grande varietà di algoritmi disponibili. Il primo passo nella scelta del giusto algoritmo di semplificazione è, con evidenza, la definizione del problema. Qual è l'obiettivo del processo semplificativo?

Ridurre la geometria ridondante? Snellire le dimensioni del modello per una visualizzazione sul web? Migliorare le prestazioni di rendering in tempo reale?

Cosa ci aspettiamo dal processo di semplificazione?

Abbiamo bisogno di preservare la geometria e regolarizzarla? Ci interessa solo un elevato livello di fedeltà visiva? I tempi di elaborazione costituiscono una discriminante?

Il campo della semplificazione poligonale sembra aver raggiunto decisamente la maturità. Gli algoritmi messi a disposizione dai ricercatori

forniscono soluzioni alla quasi totalità di domande possibili, coinvolte in una siffatta operazione. La scelta di un approccio anziché un altro è esclusivamente guidata dagli obiettivi del lavoro per il quale è richiesta una azione di riduzione della mesh poligonale.

5.2 Retopologia e *texture baking* per il recupero del dettaglio

L'operazione di semplificazione di una maglia poligonale può comportare una perdita di dettaglio e/o una modifica importante della topologia in aree in cui, al contrario, è richiesta una maggiore specificazione. Sebbene molti degli algoritmi presentati al par. 5.1.2, consentano di sottoporre al processo semplificativo solo determinate regioni della mesh, individuate con criteri e vincoli puntuali, spesso tale procedura non è sufficiente a garantire un adeguato livello di dettaglio e una topologia coerente, rendendo necessaria un'azione di **retopologia**.

Il termine, mutuato dalle tecniche di modellazione proprie dell'industria dell'*entertainment*³⁸, indica il processo di creazione di una nuova mesh che si adatta a quella esistente, tenuta come base e riferimento. La mesh ricostruita deve soddisfare due fondamentali requisiti: deve mantenere la forma della maglia originale e presentare una topologia conforme all'oggetto modellato. Essa si differenzia dal riferimento poiché ottimizzata in base alle aree da dettagliare ossia inserisce dettagli nelle zone in cui è necessario, lasciando le altre regioni in forme semplificate. L'aggiunta di dettaglio si traduce in un maggior numero di poligoni, la cui quantità è invece contenuta e ridotta al minimo nelle aree non interessate. La retopologia si sostanzia in azioni che agiscono direttamente su vertici, spigoli e facce della mesh poligonale. L'intero processo, preceduto da uno studio topologico del modello, può essere condotto con tecniche differenti per le quali non esiste una catalogazione unicamente valida e condivisa poiché i parametri da considerare sarebbero innumerevoli: strumenti offerti, tempi di elaborazione, qualità del risultato, grado di intervento del modellatore. In generale, i sistemi più diffusi di ottimizzazione di una mesh tramite retopologia si distinguono in due categorie:

- approcci tradizionali;
- approcci ibridi.

I tradizionali approcci alla retopologia prevedono l'impiego di tecniche

che consentono di lavorare direttamente su vertici, lati e poligoni (triangoli o quadrangoli). Il processo eseguito con l'impiego di queste tecniche prende il nome di "retopologia manuale". Sono tecniche con cui è facile familiarizzare, poiché basano il loro funzionamento su azioni piuttosto semplici, ma alquanto ripetitive. Con queste tecniche, l'intero processo si rivela piuttosto tedioso e *time-consuming*. Ciononostante, resta l'approccio più comunemente impiegato dalla maggior parte degli operatori, e diversi software si impegnano ad offrire strumenti che cercano di renderlo più scorrevole possibile.

Si parla di ottimizzazione:

- (i) per punti;
- (ii) per adattamento di poligoni;
- (iii) per disegno diretto;
- (iv) per linee;
- (v) per sezioni.

(i) La tecnica per punti è la più tradizionale e prevede il posizionamento manuale di ogni singolo vertice sulla superficie. I poligoni - di solito quadrangoli nell'approccio dell'industria dell'intrattenimento - vengono generati collegando i vertici a gruppi di tre o quattro alla volta, a seconda che la maglia sia basata su tessere di forma triangolare o quadrangolare. Tale poligono sarà piano e si adatterà il più possibile alla superficie sottostante, mantenendo costanti i punti di controllo indicati dall'operatore. Per adagiare e adattare automaticamente i vertici sulla superficie del modello, si ricorre alla funzione *snap*. Essendo il vertice la più piccola unità di informazione di cui è costituita una mesh, questa tecnica consente un pieno controllo sulla qualità del risultato.

(ii) Un'estensione della funzione di *snap* è la tecnica di ottimizzazione per adattamento di poligoni la quale consente il posizionamento contemporaneo di più facce con la funzione *shrinkwrap*. Tramite questa è possibile adagiare direttamente una primitiva, come un cilindro o un parallelepipedo suddiviso in poligoni più piccoli, sul modello da retopologizzare. Tale elemento verrà adattato alla superficie sottostante di cui diverrà geometria involupante e ha la possibilità di essere facilmente modificato attraverso il riposizionamento dei vertici, operazioni di *edge collapsing* per rimuovere un vertice, inversione di facce, e così via. Tuttavia, la tecnica trova impiego in contesti limitati, ad esempio terreni e paesaggi, poiché è necessaria una certa corrispondenza topologica tra la primitiva e il modello iniziale.

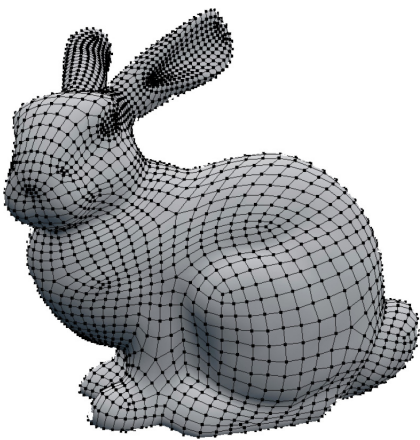


Fig. 5.2.3. La *retopology* eseguita con tecniche tradizionali prevede la creazione e gestione dei vertici che costituiranno la mesh finale.

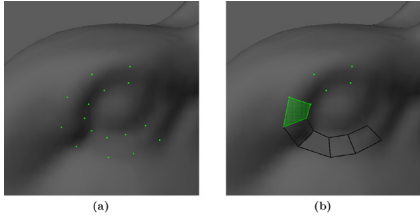


Fig. 5.2.4. Dopo aver posizionato manualmente un certo numero di vertici (a), il sistema individua automaticamente i possibili quadrangoli che possono essere generati (b).

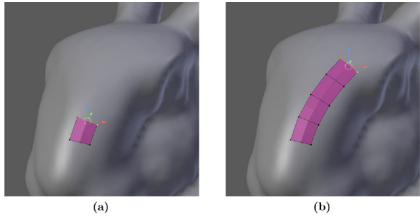


Fig. 5.2.5. A partire da un piano (a), il modello viene retopologizzato tramite estrusione (b).

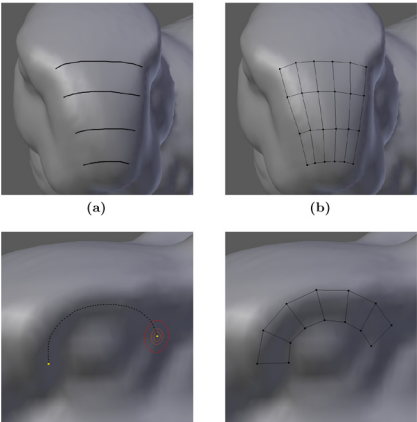


Fig. 5.2.6. Disegno a mano di una serie di curve (a), in base alle quali viene aggiunta una superficie poligonale (b).

(iii) Una ulteriore modalità di creazione dei poligoni prevede il tracciamento di quadrangoli o triangoli per disegno diretto sulla mesh originale.

(iv) Un sistema simile è quello per linee il quale comprende il disegnare a mano sulla superficie della mesh dei vettori guida che andranno suddivisi a maglie creando con delle linee una scacchiera. Le intersezioni tra le linee della scacchiera individuano i nuovi vertici dei poligoni che definiscono la maglia. Se la scacchiera, una volta formata, è congrua all'oggetto, si trasformerà in una porzione di mesh ordinata. Sebbene questa tecnica consenta di generare molti poliedri contemporaneamente e con un andamento piuttosto definito, quasi sempre richiede correzioni aggiuntive da eseguire sui singoli vertici.

(v) Infine, il metodo per sezioni è utilizzabile solo in casi particolari, esclusivamente se la mesh ha un profilo chiuso e facilmente riconoscibile. Vengono tracciate delle linee che rappresentano ipotetici piani di sezione, ortogonalmente a queste si tracciano vettori guida che indicano il verso di tracciamento dei lati dei poligoni, quindi in automatico verrà creata una maglia a contatto con quella originale ma topologicamente corretta.

Gli approcci ibridi comprendono una serie di tecniche che adottano un paradigma completamente diverso per generare una mesh. Queste tecniche consentono di lavorare con strutture gerarchicamente superiori ai poligoni. Tipicamente, strutture geometriche più complesse permettono di generare e gestire più poligoni contemporaneamente, ma non consentono di intervenire sui singoli vertici, se non in una fase successiva.

Allo stato dell'arte corrente, risulta essere disponibile un solo *tool*⁸⁹ che propone un approccio per eseguire retopologia fondato sull'utilizzo di una struttura geometrica detta *patch*. A differenza delle tecniche basate su curve, le intersezioni creano una struttura geometrica chiamata *patch* che, sulla base degli input forniti dall'utente, viene automaticamente quadrangolata (o triangolata) dal sistema, il quale si occupa inoltre di inserire automaticamente i vertici irregolari laddove necessari. La mesh finale è quindi costruita tramite la congiunzione di patch poligonali all'interno delle quali l'operatore può modificare la topologia cambiando il numero di suddivisioni per ogni lato e muovendo vertici irregolari.

La retopologia integra, dunque, il processo di semplificazione di una maglia poligonale laddove consente di sistemare gli attributi topologici di specifiche regioni di una mesh. Tali aree, corrispondenti a punti critici del

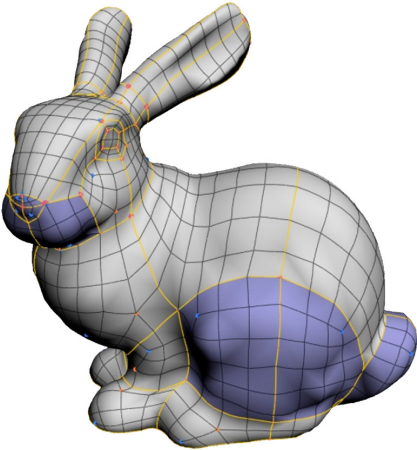


Fig. 5.2.7. Con un approccio ibrido a *patch*, non si agisce direttamente sui vertici, bensì su entità geometriche superiori.

manufatto reale, come sculture e modanature, sono altamente significative nel sistema morfologico, compositivo e semantico del complesso, per le quali è richiesto dunque un maggior livello di dettaglio geometrico.

Nonostante la mesh così ottenuta - definita *low poly* - sia di buona qualità, è indubbio che non potrà mai essere identica a quella originale - *high poly* - nei particolari più minuti.

Nel contesto del patrimonio culturale, è richiesto che il modello semplificato contenga anche i dettagli più fini, affinché risulti interscambiabile con il modello originale. La soluzione comunemente impiegata sfrutta le moderne tecniche raggiunte dal processo di *texture mapping*. L'idea è quella di immagazzinare le informazioni relative ai dettagli più fini in particolari mappe 2D la cui generazione avviene tramite un'operazione detta **texture baking**.

Si tratta di un processo algoritmico che recupera informazioni sulle superfici di un modello, come il colore o l'illuminazione, direttamente dalla scena, per poi mapparle nello spazio UV delle superfici del modello stesso. La tecnica, nel contesto applicativo specifico che si sta esaminando, consente di calcolare la differenza tra la mesh high poly e quella low poly e registrarla in texture contestuali, le quali permettono di simulare gli attributi geometrici e i comportamenti dei poligoni sebbene gli stessi non sia presenti realmente nella scena, in virtù della semplificazione geometrica. In questo modo è possibile estrarre da un modello high poly le informazioni di comportamento delle superfici, ad esempio, rispetto alla radiazione luminosa, ed utilizzare la relativa mappa per la proiezione di una texture sul modello low poly, garantendo il corretto comportamento dei materiali applicati ai poligoni semplificati. In altre parole, la tecnica permette a partire da un modello molto complesso, di essere come proiettato su un altro utilizzato come base, ma a basso numero di poligoni. Le mappe più comunemente utilizzate sono la *normal map* e la *ambient occlusion map*. La prima nasce come evoluzione di un'altra tipologia di mappa, la *bump map*, e spesso è utilizzata in unione alla *displacement map*.

Il **bump mapping**, diffuso da molti anni, è una tecnica in grado di aumentare apparentemente la complessità degli oggetti realizzati senza aumentarne il numero dei poligoni. Si basa sull'impiego, unitamente alla texture del "canale diffuso"⁴⁰, di una mappa in scala di grigio limitato a 8 bit che il motore di rendering utilizza per simulare asperità e solchi. Tale aumento di dettaglio non è geometrico, ma è aggiunto solo in fase di visualizzazione, con un trucco di illuminazione. A valori più alti di bianco corrisponde un maggior rilievo dell'oggetto dal punto di vista visivo mentre le zone

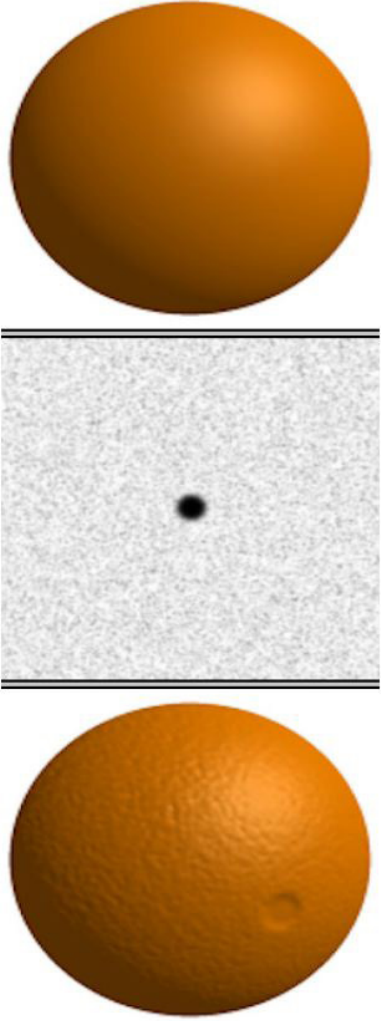


Fig. 5.2.8. Effetto del *bump mapping*.

più scure indicano depressioni. Il grigio formato dal 50% di bianco e dal 50% di nero, corrisponde alla soglia media della superficie del modello che quindi non ha in tale valore nessuna distorsione.

Il semplice bump mapping è una tecnica molto utilizzata in ambito statico perché riesce bene a simulare asperità e dettagli che in realtà non sono presenti sul modello. In ambito real-time la possibilità di muoversi liberamente e di avvicinarsi molto all'oggetto rappresentato vanificano l'effetto della bump map. Questa infatti, se ci si avvicina molto e con l'angolo sbagliato, si "rompe" mostrando l'illusione dei dettagli. Poiché gli stessi sono creati artificialmente, la sagome della geometria a cui è applicata la texture non sarà mai influenzata dalla stessa.

La normal map consente di superare i limiti delle bump maps, in applicazioni in tempo reale e interattive, utilizzando le normali alla superficie nel punto in cui l'effetto deve essere applicato con un notevole aumento di precisione e realismo. Una normale è un vettore a modulo unitario ortogonale alla superficie di ogni poligono che compone la mesh. Il suo maggiore impiego risulta nel calcolo degli effetti di ombreggiatura - *shading* - ed illuminazione. Algoritmi noti⁴¹ calcolano l'illuminazione valutando l'angolo tra la luce incidente e la normale alla superficie. Nei sistemi moderni, non viene considerata una sola normale per ogni poligono, bensì una normale per ogni suo vertice. Ciò consente di produrre un cambiamento più graduale dell'ombreggiatura tra poligoni adiacenti dal momento che condividono le normali. In questo caso, si dice che lo shading del modello è *smooth*. In caso contrario, lo shading è *hard*.

Oltre al vettore normale, per ogni vertice vengono considerati due ulteriori vettori: il vettore tangente e bitangente. Questi sono ortogonali sia al vettore normale, sia tra di loro, e le loro direzioni vengono ricavate sfruttando le coordinate dei vertici nel *texture space*. I tre vettori formano il *tangent-space normal*, ovvero il sistema di riferimento spaziale tipicamente adottato per calcolare le normali ai vertici. Questo sistema di riferimento garantisce che le normali vengano calcolate rispetto ai punti dell'oggetto stesso, utile soprattutto quando questo viene deformato. Si distingue dal sistema di riferimento globale, il *world-space normal*, ove se fossero calcolate le normali, si riscontrerebbero incongruenze nell'illuminazione del modello. Fatta questa premessa, la normal map non è altro che una texture 2D i cui pixel contengono informazioni su questi tre vettori, normale, tangente e bitangente, immagazzinate nei canali R,G,B. Rispettivamente, nel canale del rosso troviamo i valori di normale, nel canale del verde i valori di bitangente e in quello del blu i valori della tangente. Una normal map con tonalità tendenti al rosso indica valori elevati del vettore tangente, mentre

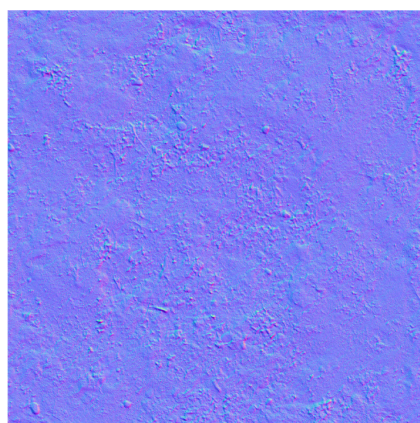


Fig. 5.2.9. Esempio di una normal map.

tendenti al verde valori elevati della binormale.

Questa particolare texture è una miscela principalmente viola e blu, se riferita al tangent-space; un assortimento di colori diversi dell'arcobaleno, se inquadrata nel world-space. In generale, può essere vista come una mappa di scostamento, in cui il colore di un pixel indica uno scostamento più o meno notevole dal vettore normale presente al vertice, dando informazioni su come dovrebbe essere ombreggiato il relativo poligono. Modificando i valori delle normali alla superficie, si cambia l'illuminazione della superficie stessa, simulando la presenza di dettagli durante il rendering. In sostanza, calcolando la normal map è possibile simulare i dettagli persi, dando l'illusione che questi siano presenti poligonalmente sul modello.

Il principale vincolo imposto dalla normal map consiste nel limitarsi a simulare gli effetti di rilievo senza effettivamente ricrearli sulla superficie. Questo limite è chiaramente visibile quando l'oggetto proietta ombre su una superficie piana. La displacement map supera questo vincolo, intervenendo direttamente sulla geometria del modello, modificandola con la creazione di veri e propri rilievi sulla mesh.

La texture si presenta come un'immagine in scala di grigi, dove il valore di grigio di ogni pixel rappresenta la quantità di *offset* da applicare al vertice. I pixel più chiari rappresentano scostamenti maggiori, positivi, mentre quelli neri comportano scostamenti in senso negativo. Anche in questo caso, il valore medio di grigio non modifica i vertici. L'elevazione/scostamento dei vertici avviene lungo la direzione perpendicolare alla superficie, quindi della relativa direzione normale.

In sostanza, questo tipo di mappa contiene informazioni sullo scostamento geometrico da applicare ad ogni vertice e per questa sua proprietà, è chiamata anche *height map*. Sebbene consenta di generare superfici complicate ricorrendo ad una semplice immagine, gli aspetti più delicati del suo utilizzo riguardano la mesh a cui tale mappa viene applicata. Al fine di produrre un risultato di qualità, è necessario che la risoluzione della mesh sia piuttosto alta perché, se la mesh contiene pochi vertici, la mappa di scostamento non produce gli effetti desiderati laddove solo pochi pixel individuano un vertice nella corrispondente posizione. Allo stesso tempo, una displacement map produrrà scostamenti più fini quando la sua risoluzione sarà maggiore. Inevitabilmente, i tempi di elaborazione e rendering vengono aumentati, impedendo talvolta un impiego real-time del modello.

Alle mappe precedenti, cui ci si riferisce genericamente come "mappe di scostamento", è affiancata anche l'ambient occlusion map che indica

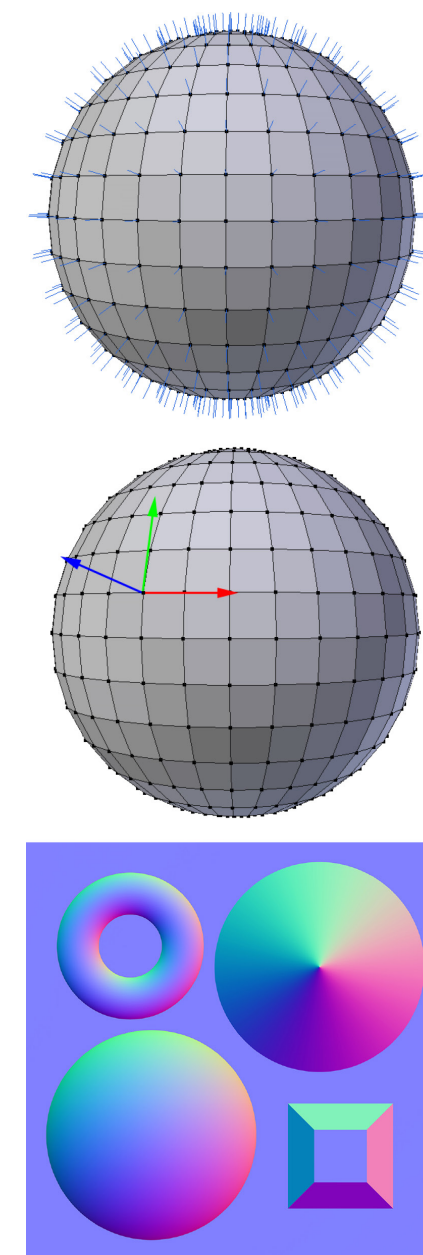


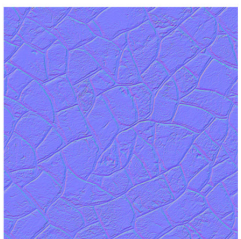
Fig. 5.3.0. Normal map e *tangent-space*. Nella prima figura, in alto, sono indicate in blu le normali ai vertici di una mesh poligonale. Per ogni vertice, i vettori normale, bitangente e tangente formano la base vettoriale del tangent-space normal, al centro. I valori di questi vettori vengono immagazzinati rispettivamente nei canali blu, verde e rosso della normal map, in basso.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.3.1. Normal map e displacement map.
La prima si presenta come una texture tendente al viola (c), mentre la seconda in scala di grigi (a). La displacement map modifica la mesh, traslando i vertici e creando effettivamente dei rilievi (b). Invece, la normal map si limita a simulare il rilievo modificando i valori delle normali (d).

quanto ogni punto del modello può risultare illuminato da una fonte di luce. È un modello di rappresentazione dell'ombreggiatura che tiene in conto l'attenuazione che la luce deve necessariamente avere in prossimità di volumi occlusi da altri, senza comportare onerosi calcoli di decadimento in tempo reale. L'informazione è registrata considerando ogni punto della geometria totale come se fosse attiva una illuminazione di tipo globale e non esclusivamente direzionale. Il processo considera un tot numero di raggi che da ogni punto della superficie dell'oggetto procede verso lo sfondo immaginato come fonte luminosa diffusa. I raggi che raggiungono questo fondo creano nella mappa una informazione di tipo luminoso da preservare in quei punti, investiti direttamente dalla fonte luminosa principale. I raggi che invece vengono intercettati da altri oggetti sono codificati nella texture come informazione di sottrazione luminosa. Sulla base dell'ambient occlusion, il modello è illuminato in maniera differenziale, tenendo gradualmente in ombra le parti occluse da superfici che non necessariamente sono geometricamente presenti. L'ambient occlusion map aumenta, in definitiva, il realismo del modello, migliorandone la percezione tridimensionale attraverso l'ottimizzazione di bordi e ombre.

5.3 Processi di strutturazione semantica di dati tridimensionali: algoritmi di segmentazione e classificazione

Contestualmente agli aspetti legati alla manipolazione, archiviazione e gestione dei modelli digitali - sia in software di modellazione che in banche dati sul web - si pongono interrogazioni sui possibili processi per strutturare le rappresentazioni tridimensionali acquisite in accordo a modelli di descrizione semantica.

A partire dalla fine degli anni Novanta, diversi protocolli per la semantizzazione di artefatti architettonici digitali sono stati codificati, allo scopo di associare alle forme spaziali tutti i saperi ad esse correlati. Nel cap. 2, si è già rilevato come la molteplicità delle ricerche mostri la sistematizzazione di approcci orientati a manipolare le rappresentazioni architettoniche, acquisite con tecniche di rilievo image-based e/o range-based, utilizzando i modelli discretizzati come base, a partire dalla quale condurre operazioni di nuova modellazione. Gli artefatti digitali sono scomposti concettualmente negli elementi geometrici via via più semplici che li definiscono, in ossequio ai vocaboli di dizionari di dominio

specifico, e organizzati secondo un sistema di relazioni del tipo parte-tutto. Individuati i componenti geometrici elementari, gli stessi vengono modellati ex novo, secondo le forme e i profili indicati dai modelli discreti. La generazione delle geometrie può essere condotta variamente. Uno degli approcci più strutturati si basa sulla selezione di entità geometriche primarie, combinate tra loro secondo differenti operazioni geometriche, volte a definire la specifica forma spaziale. Diverse rappresentazioni (nuvole di punti, nurbs, mesh strutturate, ecc.) sono collegate agli oggetti rappresentati dai termini inclusi in un dizionario, a seconda degli obiettivi di analisi specifici. Ogni elemento geometrico può essere collegato a un singolo descrittore semantico, mentre un descrittore semantico può essere associato a più elementi geometrici. Un altro protocollo di modellazione dei componenti di base è incentrato sulla manipolazione di elementi parametrici, selezionati all'interno di "famiglie" di oggetti, inquadrati in un sistema di strutturazione di una rappresentazione architettonica intesa come collezione di entità semantiche già categorizzate. La parametrizzazione del singolo componente formale consente la sua adattabilità a forme e profili specifici, classificandolo, con un leggero grado di personalizzazione, in un insieme di relazioni di origine semantica ben definito. Ogni elemento ha una sola etichetta semantica, con specifici attributi sia geometrici che gerarchici.

Accanto a questi approcci di strutturazione semantica, si collocano metodi di scomposizione geometrica del modello digitale in cui le singole entità elementari sono isolate matematicamente, in ragione di particolari vincoli geometrici impostati come parametri di calcolo di algoritmi differenziati. Tali metodi di segmentazione sono applicati sia su nuvole di punti che su mesh poligonali.

5.3.1 Metodi di segmentazione (semi)automatica di nuvole di punti

Il processo di segmentazione di una nuvola di punti consiste, in termini generali, nella divisione di gruppi di punti in sottoinsieme - normalmente chiamati "segmenti" - caratterizzati dall'avere una o più caratteristiche in comune - geometriche, radiometriche, ecc. -. A causa della complessità e varietà delle nubi puntiformi, dovuta all'irregolarità di campionamento, alla variazione di densità, alle differenti tipologie di oggetti, l'operazione della loro segmentazione è tutt'oggi un tema di ricerca molto attivo. In letteratura, ci sono svariati studi relativi



Fig. 5.3.2. Esempio di ambient occlusion map.

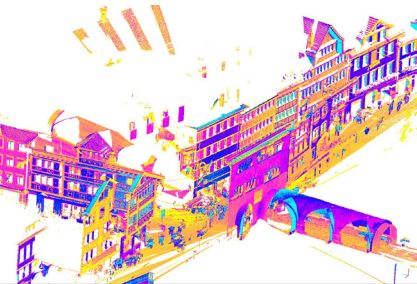


Fig. 5.3.3. Esempio di una nuvola di punti segmentata e classificata.

a questo argomento, molti dei quali sono guidati da esigenze specifiche fornite dal campo di applicazione (modellazione di edifici, documentazione e conservazione del patrimonio, robotica, e così via).

La maggior parte degli algoritmi di segmentazione formalizzati sono stati studiati per funzionare su modelli di superfici 2.5D, provenienti ad esempio da rilievi condotti con LiDAR e in alta quota. Tuttavia, alcune delle tecniche sviluppate per segmentare nuvole di punti generate da scansioni laser aeree possono essere applicate o adattate facilmente alle nubi terrestri. Chiaramente, i risultati sono influenzati dal rumore e della densità della nuvola e dalla qualità di allineamento dei dati.

Una classificazione, oramai piuttosto consolidata presso la comunità scientifica, suole raggruppare gli algoritmi di suddivisione di una nuvola di punti nelle seguenti cinque categorie⁴², in base al loro approccio principale:

- *edge-based*;
- *region growing*;
- *model fitting*;
- *hybrid method*;
- *machine learning application*.

La differenza chiave tra gli stessi è il metodo o il criterio utilizzato per misurare la similarità tra un dato insieme di punti e quindi per prendere le decisioni di raggruppamento.

• **Edge based**

Gli algoritmi di segmentazione di nuvole di punti, basati sugli spigoli, operano in due fasi principali: il riconoscimento degli spigoli per delimitare i confini di diverse regioni; il raggruppamento di punti all'interno dei confini per fornire i segmenti finali⁴³. Il riconoscimento degli spigoli e il loro raggruppamento sono guidati dalle proprietà di superficie locale, quali le normali, i gradienti, le curvature, e sono condotti attraverso l'analisi di una mappa di profondità. Essa consente di individuare i bordi definiti dai punti in cui le modifiche delle proprietà di superficie locale superano una determinata soglia. Sebbene tali metodi consentano una rapida segmentazione, possono produrre risultati non accurati in caso di rumore e densità non uniforme delle nuvole di punti, situazioni che si verificano comunemente nei dati delle nuvole di punti⁴⁴.

• **Region growing**

Si tratta di algoritmi che si fondano sulla crescita di regioni intese come raggruppamento di punti. Questi metodi partono da uno o più punti,

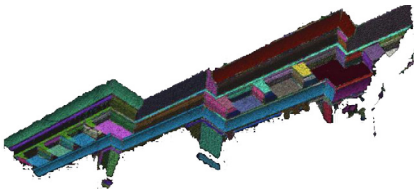


Fig. 5.3.4. Esempio di una nuvola di punti segmentata con un algoritmo di *region growing*.

identificati come “punti seme”, che hanno specifiche caratteristiche che li accomuna. A partire da questi, vengono progressivamente selezionati e raggruppati punti vicini con attributi simili.

Nello specifico, i punti seme sono individuati in base al valore di curvatura di ciascun punto mentre la regione è determinata alla luce di criteri come la prossimità dei punti e la planarità delle superfici. Varianti successive all'algoritmo di base, introdotto da Besl, et al., hanno introdotto l'uso di proprietà colorimetriche accanto a criteri geometrici⁴⁵.

Il sistema di raggruppamento può essere sia *bottom-up* che *top-down*.

Il primo ha origine nella individuazione dei punti seme intorno a cui crescono le regioni, sulla base di criteri di similarità noti. Tali approcci dipendono fortemente dai punti seme selezionati. Una loro selezione imprecisa influirà necessariamente sul processo di segmentazione, causando una sotto o sovra segmentazione.

Gli approcci dall'alto al basso, invece, iniziano con l'assegnazione di tutti i punti a un gruppo e il successivo adattamento di singola superficie a tale insieme di punti. Evidentemente, il limite di questa impostazione risiede nei criteri di individuazione del dove e come suddividere la regione iniziale. In generale, i metodi di region growing sono più robusti nei confronti del rumore rispetto a quelli edge based. Tuttavia, questi metodi sono sensibili sia alla posizione delle regioni iniziali dei semi che alla stima imprecisa delle normali e delle curvature dei punti vicino ai confini delle regioni⁴⁶.

• **Model fitting**

Questo approccio si basa sull'osservazione che molti oggetti creati dall'uomo possono essere decomposti in primitive geometriche come piani, cilindri e sfere. Pertanto, forme primitive possono essere adattate ai dati delle nuvole di punti e i punti che si rivelano conformi alla rappresentazione matematica della forma primitiva, possono essere etichettati come un segmento.

Nell'ambito della suddetta categoria, due sono gli algoritmi più diffusamente utilizzati:

Hough Transform HT⁴⁷, impiegato per rilevare piani, cilindri e sfere;

Random Sample Consensus RANSAC⁴⁸, utilizzato per estrarre forme da punti disegnati casualmente con una bassa quantità di dati per costruire primitive di forme possibili. Queste forme sono controllate rispetto a tutti i punti del dataset per determinare un valore che rappresenti il numero di punti più congruente per l'adattamento migliore.

Nonostante le limitazioni generali di entrambi gli algoritmi, imputabili in prima istanza alla complessità delle forme costruite, il RANSAC risulta in generale più efficiente in relazione ai risultati di segmentazione e al tempo

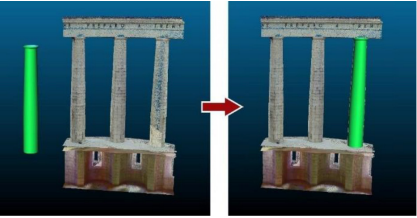


Fig. 5.3.5. Esempio di una nuvola di punti segmentata con algoritmi di *model fitting*.

di esecuzione, laddove può elaborare una grande quantità di dati di input in un tempo trascurabile. D'altra parte, HT risulta più lento e più sensibile ai valori dei parametri di segmentazione. Diverse implementazioni sono state proposte in letteratura⁴⁹, tuttavia, nel campo dell'architettura, i dettagli non possono essere sempre modellati in forme geometriche facilmente riconoscibili. Quindi se alcune entità possono essere caratterizzate da proprietà geometriche, altre sono più facilmente distinguibili dal loro attributo di colore⁵⁰.

- **Hybrid segmentation**

In questa categoria di algoritmi sono inclusi approcci che non codificano nuovi strumenti bensì il processo di segmentazione è condotto attraverso una combinazione di uno o più metodi, formalizzati nelle categorie precedenti. Ne consegue che il loro successo dipende strettamente dalla validità e il buon esito degli algoritmi sottostanti⁵¹.

- **Machine learning**

Esistono in letteratura, alcuni algoritmi di segmentazione che si basano su metodi di apprendimento automatico. Si tratta di algoritmi che, in termini generici, sfruttano l'intelligenza artificiale per consentire ai computer di prendere decisioni basate su dati empirici e di addestramento. In quest'ottica, si distingue tra l'apprendimento senza supervisione e quello supervisionato o rinforzato. Il primo - *unsupervised learning* - è definito come una classe di problemi in cui si cerca di determinare come sono organizzati i dati. Si differenzia dall'apprendimento supervisionato - *supervised and reinforcement learning* - poiché si basano su un insieme di esempi di formazione forniti per apprendere come eseguire correttamente un'attività.

Il loro impiego nel campo della segmentazione di nuvole di punti richiede, come sottolineato da Weinmann, et al.⁵², di trovare funzionalità robuste per affrontare l'eterogeneità di una nube puntiforme, puntando sulla qualità anziché sulla quantità del dato. Se, da un lato, questi approcci sono abbastanza robusti e flessibili, dall'altro si basano sulla densità della nuvola di punti e normalmente dispongono di un tempo di calcolo molto lungo. I metodi di segmentazione per apprendimento automatico si dividono principalmente in due categorie: metodi basati su raggruppamenti rispetto a specifici attributi e metodi basati su raggruppamenti gerarchici.

La prima tipologia - *K-means clustering* - involve un algoritmo in grado di classificare o raggruppare insieme di punti tridimensionali in k gruppi usando attributi/caratteristiche puntuali. Il clustering viene eseguito

riducendo al minimo la somma dei quadrati delle distanze tra il punto e il centroide del cluster corrispondente. L'algoritmo originale fu presentato da MacQueen, et al.⁵³, e successivamente sfruttato per la segmentazione di nuvole di punti da vari ricercatori, come evidenziato da Grilli, et al.⁵⁴.

La seconda categoria - *hierarchical clustering* - ricomprende metodi che calcolano misure/caratteristiche rappresentative per ciascun punto tridimensionale della nuvola, sfruttando per es. gli attributi geometrici e radiometrici. Le misure rappresentative sono la posizione del punto, le normali di superficie stimate localmente, i residui delle procedure di fitting, ecc. Generalmente tali algoritmi creano una scomposizione gerarchica di un set di dati dividendolo iterativamente in sottoinsiemi più piccoli, fino a quando ciascun sottoinsieme è costituito da un solo oggetto⁵⁵. Tra questi, uno dei più diffusi è CANUPO⁵⁶, un algoritmo supervisionato incentrato sulle proprietà geometriche 3D della nuvola di punti considerate su più scale in cui, utilizzando un approccio probabilistico, i punti con l'incertezza maggiore possono essere rimossa dalla classe sbagliata⁵⁷.

5.3.2 Metodi di segmentazione (semi)automatica di mesh 3D

L'operazione di segmentazione di un modello poligonale consiste nella scomposizione della sua geometria tridimensionale in sotto-elementi caratterizzati generalmente da proprietà uniformi⁵⁸.

È possibile distinguere due classi generali di processi di segmentazione, in relazione alla tipologia di sotto-elementi individuati.

Nell'approccio *part-type*, l'obiettivo è decomporre l'oggetto rappresentato dalla mesh in parti significative, per lo più volumetriche.

Nell'approccio *surface-type* lo scopo è suddividere la maglia in superfici, nel rispetto di determinati criteri.

La classificazione canonica delle tecniche di decomposizione di una maglia è incentrata sul livello di approssimazione raggiunto dal processo nella formulazione della soluzione. Il problema di base di una segmentazione può essere identificato con la riconduzione di componenti della mesh a primitive, distinte in sottogruppi, in analogia ai temi del clustering classico. Di conseguenza, i diversi algoritmi utilizzati per la segmentazione delle mesh possono essere catalogati come varianti dei tradizionali algoritmi di raggruppamento e raccolti nelle seguenti classi:

- *region growing* (che include i metodi *multiple source* e *watershed*);



Fig. 5.3.6. Esempio di una nuvola di punti segmentata con un algoritmo di *machine learning* - *hierarchical clustering*.

- *hierarchical clustering*;
- *iterative clustering*;
- *spectral graph analysis*.

In questa sede, non ci si soffermerà molto sulla descrizione delle tipologie laddove la nomenclatura stessa esplicita la loro relazione con le categorie esaminate al par. 5.2.1. Pertanto, di seguito è fornita esclusivamente una introduzione a ciascuna tipologia, senza pretesa di esaustività, e con richiami ad approfondimenti bibliografici.

- **Region growing**

In questa categoria rientrano gli approcci più semplici tra tutti i possibili. L'operazione di segmentazione è condotta a partire dall'individuazione di un componente=seme dal quale dilatare incrementalmente la divisione in sotto parti.

La discriminante tra le varie procedure che applicano il modello del region growing è il principio che definisce quale componente può essere unito ad un determinato cluster (distanza tra le facce, normali, curvatura, ecc.)⁵⁹.

Due varianti della classe considerata sono gli algoritmi *multiple source* e *watershed*.

Il metodo multiple source si caratterizza per l'impiego nella fase iniziale di un numero considerevole di “semi” su cui l'algoritmo lavora in parallelo. L'idea principale è di creare sulla mesh celle di Voronoi, quindi considerare il duale proprio come in un comune processo di triangolazione standard⁶⁰. L'algoritmo watershed region growing dispone del parametro di altezza per determinare e comporre i semi. Il sistema elenca ogni regione in cui il valore della funzione di altezza è minimo. Ognuna di esse è il seme iniziale del processo. A partire dalle regioni individuate, le stesse crescono fino a raggiungere il valore massimo del parametro, quindi si divide in due sotto parti⁶¹.

- **Hierarchical clustering**

Simile alla precedente tipologia, gli algoritmi di clustering gerarchico si differenziano principalmente per i criteri di raggruppamento e per l'uso di logiche di priorità nell'ordine di processamento.

Il modello, che si incentra sulla costruzione bottom-up di un albero gerarchico, inizializza ogni faccia con il proprio cluster, separatamente. Durante il processo, a ogni coppia di cluster viene assegnato un livello di priorità in termini di “costo” per unirla a un altro cluster. Le coppie che comportano errori minori vengono raggruppate⁶².

- **Iterative clustering**

I due metodi precedenti sono spesso descritti come non parametrici, poiché il numero di cluster risultanti è sconosciuto. In un approccio parametrico, al contrario, il numero di cluster viene assegnato a priori. La segmentazione può quindi essere formulata come un problema variazionale di ricerca della segmentazione ottimale perpetuato ricercando iterativamente la migliore segmentazione per un numero dato di cluster. La base di questo approccio è l'algoritmo *k-means* la cui logica generale, molto simile a quella descritta al par. 5.2.1, fu introdotta per maglie poligonali da Lloyd⁶³.

- **Spectral graph analysis**

Questo tipo di algoritmo considera una procedura top-down con la quale è individuata la migliore perimetrazione - *boundary* - tra tutte le sotto parti⁶⁴. Nella vastità di algoritmi strutturati per decomporre una maglia tridimensionale, il fattore più importante che influisce sul risultato è, in verità, il criterio per decidere quali elementi appartengono allo stesso segmento e la scelta dei vincoli imposti al processo di partizionamento, indipendentemente dall'algoritmo utilizzato.

Ci sono molte caratteristiche di una mesh utilizzate come **criteri** per chiarire l'appartenenza di suoi elementi a uno stesso gruppo e ottimizzare l'implementazione delle tecniche di segmentazione. Queste funzionalità possono essere riassunte come segue:

- planarità;
- forme geometriche avanzate (sfere, cilindri, coni, superfici sviluppabili);
- differenza tra le normali dei vertici o degli angoli diedri tra le facce;
- curvatura;
- distanza geodetica;
- simmetria;
- convessità;
- asse mediale e diametro della forma;
- caratteristiche di movimento⁶⁵.

Inoltre, esistono tre principali **tipi di vincoli** possibili per guidare il processo di segmentazione:

- vincoli di cardinalità;
- vincoli geometrici;
- vincoli topologici.

I vincoli di cardinalità definiscono un insieme di condizioni che influiscono sul numero di sotto parti generate nel processo di segmentazione e sul numero di componenti in ciascuna sotto parte. Questi vincoli, nello specifico, consentono di impostare il numero massimo (o minimo) di componenti in ciascuna sotto parte, producendo un partizionamento bilanciato.

I vincoli geometrici sono un insieme di condizioni applicate alle regioni della mesh come distanza, diametro, volume, o attributi più complicati come convessità, condizioni volumetriche. Tali vincoli possono a volte essere ricondotti a un problema di ottimizzazione (massimizzazione o minimizzazione). Ad esempio, è possibile minimizzare gli attributi geometrici quali distanze, diametri della regione e aree, ai fini di una suddivisione più equilibrata.

I vincoli topologici coinvolgono un insieme di condizioni relative al layout dell'intera maglia poligonale. Ad esempio, alcune tecniche preferiscono che le partizioni siano equivalenti a un disco per semplificare un successivo processo di segmentazione. Difatti, il numero di componenti della mesh che sono ben connessi tra loro all'interno delle sotto parti, influenza l'intero processo di segmentazione.

5.3.3 Approcci di classificazione semantica

Una volta che una nuvola di punti o una mesh poligonale è stata segmentata, ogni segmento è associato ad una etichetta che organizza la rappresentazione tridimensionale in un sistema di classi di significazione semantica. La procedura di etichettatura delle classi è condotta normalmente secondo tre diversi approcci:

- approccio supervisionato;
- approccio non supervisionato;
- approccio interattivo.

Il primo gruppo si caratterizza per l'impiego di categorie semantiche apprese da un dataset di dati già annotati. Il modello, selezionato come riferimento, è utilizzato per fornire una classificazione semantica all'interno set di dati che si vuole annotare. L'approccio richiede una cospicua quantità di dati annotati per addestrare il processo. Nell'approccio non supervisionato, i dati vengono automaticamente suddivisi in segmenti in base alla parametrizzazione dell'algoritmo fornito

dall'utente. Non sono richieste annotazioni di riferimento ma il risultato potrebbe non essere conforme con l'intenzione dell'utente. La terza tipologia vede l'utente attivamente coinvolto nel processo di segmentazione/classificazione, come guida nell'estrazione dei segmenti. Questa impostazione richiede uno sforzo da parte dell'operatore, chiamato a dare feedback durante le fasi di elaborazione, ma garantisce contestualmente un risultato allineato con i desiderata.

Approcci recenti, indicati nel cap. 2, contemplano la possibilità di associare descrittori semantici direttamente su supporti bidimensionali come fotografie, notevolmente preferiti da archeologi e restauratori, dalle quali, attraverso procedure di fotogrammetria digitale, è ottenuta una nuvola di punti già etichettata.

5.3.4 Osservazioni

I processi di segmentazione e classificazione finora formalizzati non possono considerarsi risolutivi del tema della strutturazione semantica di modelli architettonici. Riconoscere, con approcci semi-automatici, sottosezioni di nuvole di punti o di maglie poligonali e qualificarle come componenti di architettura (muri, finestre, porte, ecc.) in rispondenza a criteri geometrici e topologici, non è sufficiente. Per esemplificazione, una volta aver isolato e raggruppato quegli elementi che, per i loro attributi qualificanti, sono riconducibili alla classe semantica di un muro, è necessario specificare come questo muro è collegato, a quali pareti è adiacente e in che relazioni gerarchiche si dispone nello spazio. Solo in questo modo è possibile definire le relazioni reciproche dei componenti che strutturano un'opera di architettura. In aggiunta, le componenti architettoniche di manufatti storici spesso perdono la loro somiglianza nel tempo a causa di deterioramenti e alterazioni. Quindi, per la produzione di rappresentazioni tridimensionali semanticamente arricchite, l'uso di algoritmi di segmentazione automatica o il riconoscimento di forme primitive non è realisticamente adeguato.

Note

- 1 Cohen, et al., 1996; Arvo, et al., 2015.
- 2 Cignoni, et al., 1997.

3 Hoppe, 1996.

4 Ronfard, et al., 1996.

5 Lindstrom, et al., 1998.

6 Aspert, et al., 2002.

7 Ovreiu, et al., 2011.

8 Luebke, 2001.

9 <https://en.wikipedia.org/wiki/Octree>

10 Arvo, et al., 2015.

11 Rossignac, et al., 1993.

12 Low, et al., 1997.

13 Volumetric Picture element. È l'unità elementare dell'informazione di volume rappresentata in tre dimensioni. È la controparte tridimensionale del pixel bidimensionale.

14 Tipicamente la rimozione di un vertice elimina tre bordi e due facce.

15 Franc, et al., 2002.

16 Klein, et al., 1996.

17 Ronfard, et al., 1996; Xia, et al., 1997.

18 Algorri, el al., 1994.

19 Hoppe, 1996.

20 Garland, et al, 1997; Schroeder, 1997.

21 Hoppe, 1996; Popovic, et al., 1997.

22 Cignoni, et al., 1997.

23 Schroeder, et al., 1992.

24 Attene, M., Algoritmi per la semplificazione di griglie di triangoli, Relazione di approfondimento per il corso di Modellazione Geometrica, Università degli studi di Genova.

25 Hamann, 1994.

26 Isler, et al., 1996.

27 Zhigeng, et al., 2010; Arvo, et al., 2015.

28 Cohen, et al., 1996.

29 Allienz, et al, 2008.

30 Arvo, et al, 2015.

31 Lindstrom, et al., 2000.

32 Zang, et al., 2002.

33 Ha Lee, et al., 2005.

34 Luebke, 2001.

35 Fritzke, 1995.

36 Alvarez, et al., 2006; Alvarez, et al., 2007; Arvo, 2015.

37 Golovinskiy, et al, 2009; Tiangiang, et al., 2012.

38 L'industria dell'intrattenimento è costituita principalmente da due settori: quello cinematografico e quello videoludico. In entrambi, accade spesso di modellare i personaggi, i characters, e inserirli in set reali o virtuali. I modelli utilizzati devono necessariamente presentare un alto livello di dettaglio, con conseguente elevato numero di poligoni. Accade spesso, quindi, che la mesh, in virtù del processo di sculpturing, cioè della fase di aumento del dettaglio e della caratterizzazione organica del personaggio, diviene troppo fitta e ciò creerebbe problemi nell'animazione e nella gestione in caso di molti personaggi contemporaneamente inseriti nella scena e non istanziabili.

39 SketchRetopo, sviluppato dal gruppo di ricerca Interactive Geometry Lab, appartenente all'Institute of Visual Computing dell'università ETH Zurich.

40 La diffuse map è una texture che contiene unicamente l'informazione cromatica.

41 Come il Phong shading ed il Gouraud shading.

42 Sapkota, 2008; Nguyen, et al., 2013; Grilli, et al, 2017.

43 Rabbani, et al., 2006.

44 Sappa, et al., 2001; Wani, et al., 2003; Grilli, et al., 2017.

45 Vosselman, et al., 2004.

46 Grilli, et al., 2017.

47 Ballard, 1991.

48 Fischer, et al., 1981; Gonizzi Barsanti, et al., 2017.

49 Scnabel.et al., 2009; Chen, et al., 2010; Poux, et al., 2016.

- 50 Barnea, et al., 2013; Grilli, et al., 2017.
- 51 Grillo, et al., 2017.
- 52 Weinmann, et al., 2013; Weinmann, et al., 2015.
- 53 MacQueen, 1967.
- 54 Comaniciu, et al., 2002; Yamauchi, et al., 2005; LeCun, et al., 2015; Grillo, et al., 2017.
- 55 Ng, et al., 1994; Xiao, et al., 2013.
- 56 Brodu, et al., 2012.
- 57 Gonizzi Barsanti, et al., 2017.
- 58 Manferdini, et al., 2010.
- 59 Chazelle, at al., 1995; Lavouè, et al., 2005; Shepper, et al., 2006.
- 60 Eck, et al., 1995.
- 61 Mangan, et al., 1998; Mangan, et al., 1999; Meyer, et al., 2002; Sun, et al., 2002; Zuckerberger, et al., 2002; Lavouè, et al., 2005.
- 62 Garland, et al., Gelfand, et al., 2004; 2001; Attene, et al., 2006.
- 63 Lloyd, 1982; Shamir, 2008.
- 64 Karni, et al., 2000, Zhou, et al., 2004; Shamir, 2008; Rashad, et al., 2017.
- 65 Shamir, 2008; Rashad, et al., 2017.

CAPITOLO SESTO

Database per la raccolta e la consultazione delle risorse digitali.
Caratteristiche e modelli a confronto

L’associazione di etichette semantiche alle rappresentazioni architettoniche digitali definisce il primo fondamentale passaggio per l’organizzazione del corpus documentario connesso alle forme spaziali. Una volta strutturati i modelli tridimensionali intorno a codici di descrizione semantica e filtrati in ragione di una loro più agevole manipolazione, è necessario individuare il repository più adatto per la gestione integrata di risorse così eterogenee, dinamiche, in rapido cambiamento e interconnesse nonché capace di essere interrogato da Intelligenze Artificiali per il recupero immediato delle conoscenze.

Ad oggi, il panorama di soluzioni tecnologiche offerte per l’archiviazione, la gestione e la condivisione delle risorse digitali è dominato da due tipologie di database: relazionali e a grafo.

6.1 Database relazionali

Affermatisi a partire dagli anni Ottanta, i database relazionali si caratterizzano per la capacità di memorizzare e collegare dati, altamente strutturati in colonne predeterminate di specifiche tipologie e molteplici righe di informazioni¹. La struttura base, dunque, di tale categoria di banche dati è enucleata in tabelle, articolate in righe e colonne, cui le risorse devono essere necessariamente scomposte in una organizzazione piuttosto rigida².

NAME	COUNTRY	AGE	UNI
John	UK	21	Princeton
Mary	USA	19	Yale
Li	China	23	Princeton
Alice	UK	20	Princeton
Michal	Israel	25	Brown

Fig. 6.1.1. Tabella tipo in un database relazionale.

ID	NAME	DEPT	STATE
92	Princeton	4Future	NJ
34	Yale	P0815	CT
1	Brown	A42	RI

Fig. 6.1.2. Tabella tipo in un database relazionale. Aggiunta di informazioni tramite creazione di nuove tabelle e codici ID.

ID	COUNTRY	LEADER
17	UK	May
12	USA	Trump
19	China	Xi Jinping
17	UK	May
112	Israel	Netanyahu

Fig. 6.1.3. Tabella tipo in un database relazionale. Aggiunta di informazioni tramite creazione di nuove tabelle e codici ID.

NAME	COUNTRY	AGE	UNI
John	17	21	92
Mary	12	19	34
Li	19	23	92
Alice	17	20	92
Michal	112	25	1

Fig. 6.1.4. Tabella tipo in un database relazionale con le chiavi esterne di connessione tra i dati.

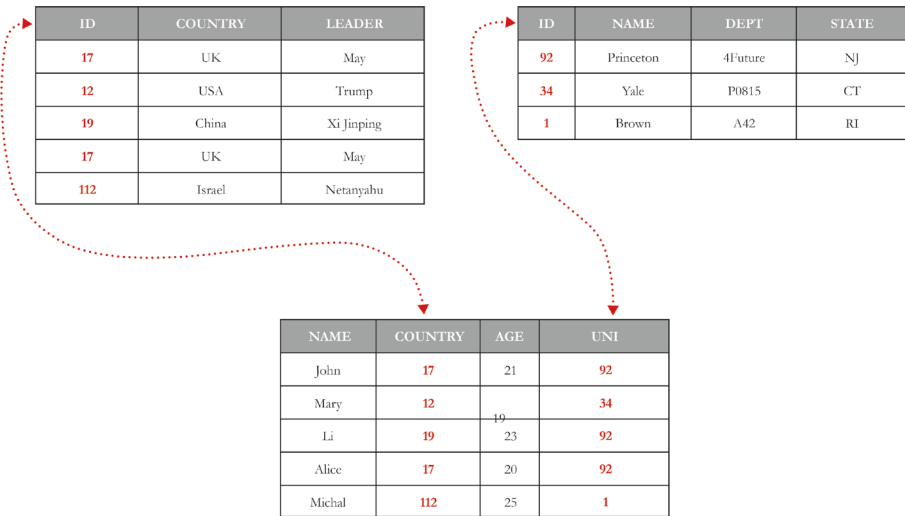
Fig. 6.1.5. Diagramma entità/associazione delle informazioni registrate in tabelle.

Una tabella ideale all’interno di una database relazionale è simile a questa (Figura 6.1.1). Le colonne dell’esempio organizzano le informazioni relative alla categoria ‘Persona’ di cui è indicato il nome, il paese di provenienza, l’età, l’università di impiego.

In uno schema organizzativo di tal tipo, è difficile mantenere la coerenza dei dati, in primo luogo, per la presenza di voci ripetute più volte; in secundis, per la possibilità - concreta - di modificazione dei dati (ad esempio, il cambiamento del nome dell’università). Per rispondere a queste necessità, viene strutturata un’altra tabella con i nominativi delle università, cui viene associato un ID, e popolata con alcune informazioni aggiuntive sulle stesse come, ad esempio, il nome dei dipartimenti, del direttore, e così via (Figura 6.1.2). Gli IDs impiegati nella seconda tabella sono delle “chiavi numeriche primarie” utilizzate come riferimento per il collegamento - “chiavi esterne” - alla prima tabella.

L’approccio è iterato e iterabile per tutte le altre categorie di informazioni (ad esempio, per il paese di provenienza; Figura 6.1.3) con la conseguenza che la tabella di partenza diventa sempre più difficile da interpretare (Figura 6.1.4). In un corpus di dati così connesso, un diagramma entità/associazione E-R diventa necessario per mostrare e per comprendere le connessioni e come la collezione di informazioni sia interrotta in ragione di una strutturazione in tabelle (Figura 6.1.5).

La complessa organizzazione di un database relazionale fin qui descritta, permette di comprende come i riferimenti ad altre righe e tabelle siano indicati richiamando gli attributi chiave principali attraverso colonne contenenti queste chiavi esterne³. I collegamenti, ossia le tabelle di entità associativa, chiamate *Join*, sono calcolati al momento della formulazione



della query facendo corrispondere le chiavi primarie e quelle esterne di tutte le righe delle tabelle partecipanti nell’interrogazione. La figura 6.1.6 mostra il concetto di connessione tra Alice (dalla tabella ‘Persona’) e un dipartimento (nella tabella ‘Dipartimento’) mediante una tabella di join ‘Persona/Dipartimento’ contenente l’ID della persona in una colonna e l’ID del dipartimento associato nella colonna successiva.

Come è evidente, la comprensione delle connessioni è complessa poiché è necessario conoscere i valori ID di Alice e ID del dipartimento, eseguendo nella pratica ulteriori ricerche per trovarli.

La possibile query per interrogare il database così organizzato, potrebbe essere la seguente:

```
SELECT name FROM Person
LEFT JOIN Person_Department
  ON Person.Id = Person_Department.PersonId
LEFT JOIN Department
  ON Department.Id = Person_Department.DepartmentId
WHERE Department.name = “IT Department”
```

 (6.10)

Scritta in SQL, il linguaggio di query dichiarativo usato per interrogare un database di tipo relazionale, la domanda richiede di cercare la tabella ‘Persona’, potenzialmente composta di milioni di righe, (a sinistra nella figura 6.1.6) per trovare l’utente Alice e il suo ID utente 815. Quindi, di cercare la tabella ‘Persona/Dipartimento’ (al centro dell’immagine) per individuare tutte le righe che fanno riferimento all’ID persona di Alice - 815. Una volta recuperate le 3 righe rilevanti, si procede alla tabella dei dipartimenti (sulla destra della figura) per cercare i valori effettivi degli IDs dei dipartimenti - 111, 119, 181 -. Solo adesso è possibile sapere che Alice fa parte dei dipartimenti 4Future, P0815 e A42.

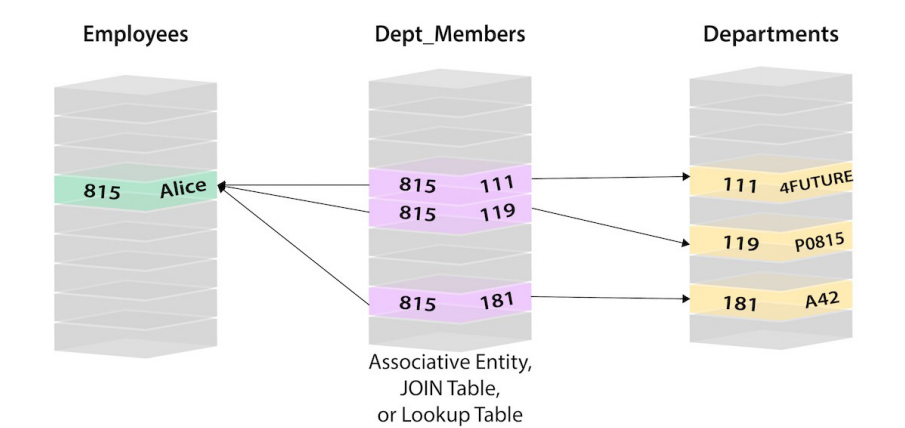


Fig. 6.1.6. Visualizzazione del processo di Join in un database relazionale.

Le operazioni di join, necessarie per recuperare le connessioni tra le risorse archiviate, risultano pesanti in termini di elaborazione e di memoria e hanno un costo esponenziale. Quando, poi, le relazioni tra i dati del modello sono sempre più complesse e numerose - le cosiddette *many to many relationships* - la creazione di tabelle di join e auto-join diventa sempre più onerosa e dispendiosa⁴. Una possibile soluzione è la denormalizzazione dei dati, volta a ridurre il numero di join necessari, la quale, tuttavia, interrompe l'integrità dei dati stessi.

In conclusione, i database relazionali tradizionali modellano i dati del dominio di conoscenza solo come un insieme di tabelle, righe e colonne, pertanto funzionano bene quando le informazioni sono prevedibili e si adattano ad una organizzazione così rigida. Le connessioni tra le risorse sono estratte eseguendo join complessi e auto-join, quando il set di dati diventa più correlato. Le queries interrogative hanno spesso una sintassi molto lunga, sono tecnicamente complesse da costruire e costose da gestire. Inoltre, far funzionare questo tipo di database in tempo reale mentre gli utenti finali non sono in attesa, non è facile, con le prestazioni che rallentano all'aumentare delle dimensioni totali del corpus informativo⁵. Da qui l'ascesa di un altro tipo di database, ottimizzato per quei domini ricchi ed estremamente connessi, che il software relazionale non è così ben equipaggiato nel trattare: il database a grafo.

6.2 Database a grafo

Diffusisi a partire dagli anni Duemila, i database a grafo si sono ben presto affermati per la loro caratteristica modellazione dei dati, strutturati in un sistema, come indica la stessa denominazione classificatoria, di tipo a grafo. Formalmente, un grafo è un insieme di vertici e spigoli ossia un insieme di nodi e relazioni che li collegano tra loro. Nei grafi, le entità sono rappresentate come nodi e i modi in cui queste entità sono connesse nel mondo reale, sono rappresentate come relazioni⁶. A differenza di altri sistemi di gestione informativa, nel modello di dati a grafo, le relazioni assumono la stessa importanza rispetto ai dati stessi. Ciò significa che non è necessario inferire connessioni tra entità utilizzando proprietà speciali come chiavi esterne. Assemblando nodi e relazioni in strutture connesse, i database a grafo consentono di costruire modelli semplici ma sofisticati, in perfetta aderenza al dominio di conoscenza che si sta rappresentando. I dati rimangono, infatti, notevolmente simili alla loro forma nel mondo reale dal momento che vengono scomposti in entità piccole, normalizzate, ma riccamente connesse.

Ogni nodo contiene, direttamente e fisicamente, un elenco di record di relazioni che rappresentano le relazioni con altri nodi. Questi record di relazioni sono organizzati per tipo e direzione e possono contenere attributi aggiuntivi. Ogni volta che si esegue l'equivalente di un'operazione join, il database a grafo utilizza questo elenco, accedendo direttamente ai nodi connessi ed eliminando la necessità di costosi calcoli di ricerca e corrispondenza. La struttura lineare del grafo consente, quindi, di ottenere modelli di dati molto più semplici e più espressivi rispetto a quelli prodotti utilizzando database relazionali tradizionali. Quanto affermato finora, risulta subito comprensibile se si confronta il modello di dati della figura 6.1.6, riferimento a una banca dati relazionale, con quella di tipo a grafo, che segue (Figura 6.1.7).

Nella versione a grafo, vi è un singolo nodo per 'Alice' connessa al nodo 'Persona' dalla relazione 'Nome'. Alice appartiene a 3 diversi dipartimenti, per ciascuno dei quali esiste un nodo collegato sempre da una relazione nominativa a nodi 'Dipartimento'. Per scoprire a quali dipartimenti appartiene Alice, è sufficiente esplorare il grafo che per il nodo di 'Alice', attraversa tutte le relazioni 'Appartiene a' - *belongs-to* - che collegano in maniera diretta ed immediata Alice ai nodi di dipartimento.

La modellazione dei dati sotto forma di nodi e relazioni rende tale tipologia di database estremamente adatti a domini in cui le relazioni all'interno dei dati sono importanti e numerose e le queries implicano l'esplorazione e lo sfruttamento delle stesse. Inoltre, la flessibilità di un modello a grafo consente di aggiungere nuovi nodi e relazioni senza compromettere la rete esistente, permettendo di lavorare non solo con singoli punti di informazione, ma anche con reti di relazioni in evoluzione. In sintesi, una delle maggiori differenze tra i database a grafo e i database relazionali risiede nelle connessioni tra i nodi i quali, nel sistema a grafo, si collegano direttamente in modo tale che i dati relativi diventano una semplice questione di connessioni successive.

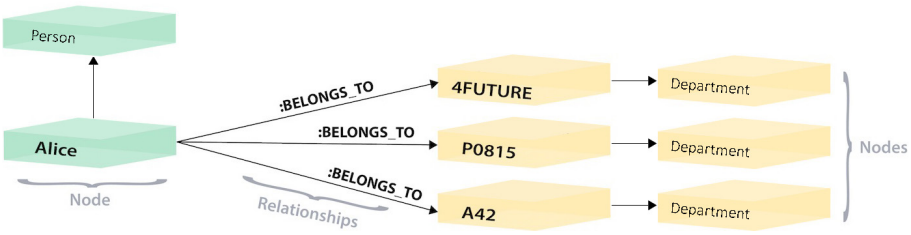


Fig. 6.1.7. Visualizzazione del modello di dati, connessi, in un database a grafo.

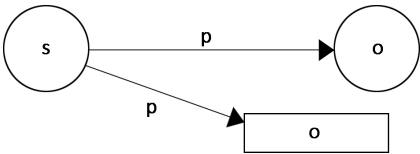


Fig. 6.1.8. Schematizzazione della struttura di un modello a grafo RDF.

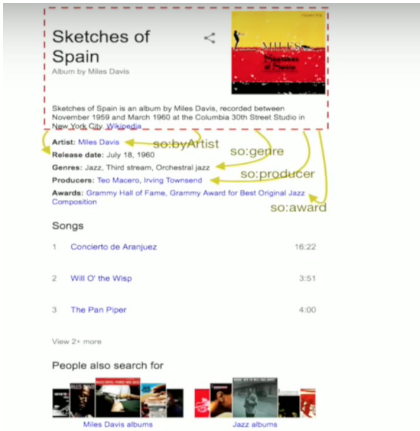


Fig. 6.1.9. Ricerca di un album in Google e relativi campi informativi.

6.1.1 Il modello RDF

Il modello di database a grafo oggi più diffuso è RDF, acronimo di *Resource Description Framework*.

Si tratta di un modello destinato allo scambio e sfruttamento dei dati, promosso come standard all’inizio del secolo, con l’avvento del web semantico⁷.

La sua struttura si caratterizza per la modellazione delle informazioni, rappresentate in forma di grafo, secondo delle *triple* ossia affermazioni composte da tre elementi: due vertici/nodi collegati da uno spigolo. Lo schema è nominato *soggetto - predicato - oggetto* in cui il soggetto è una risorsa quindi un nodo del grafo; il predicato rappresenta la relazione e l’oggetto è o un altro nodo o un valore letterale, graficamente rappresentato sempre da un vertice (Figura 6.1.8). Nodi e relazioni non hanno una struttura interna ma sono individuati da un URI, identificatore univoco (par. 3.3.3)⁸.

Per comprendere appieno come funziona un modello a triple RDF, si può eseguire una ricerca in Google e digitare *Sketches of Spain*, un album musicale di Miles Davis⁹. La ricerca restituisce una descrizione dell’album articolata in campi informativi che riportano il nome dell’artista, la data di uscita, il genere, i produttori e alcuni riconoscimenti (Figura 6.1.9).

Una possibile strutturazione dei dati in RDF (Figura 6.2.0), mostra chiaramente che le triplette sono identificate da un URI, rappresentante il soggetto, il predicato è il nome e l’oggetto è *Sketches of Spain*.

Queste informazioni sono visualizzate graficamente come segue (Figura 6.2.1).

I nodi a sinistra rappresentano l’album da cui si dipartono una serie di collegamenti. Le forme rettangolari rappresentano valori letterali ossia la descrizione - l’album di Miles Davis, il genere, il titolo -. Le connessioni

```
@prefix schema: <http://schema.org/> .
@prefix nso: <http://schema.googleapis.com/> .

INSERT DATA {
  <http://g.co/kg/m/0567wt>
    schema:name "Sketches of Spain" ;
    a schema:MusicAlbum ;
    schema:description "Album by Miles Davis" ;
    schema:genre "Jazz" ;
    nso:detailedDescription {
      schema:license "Creative_Commons_Attribution-ShareAlike_3.0_License" ;
      schema:url "http://en.wikipedia.org/wiki/Sketches_of_Spain" ;
      schema:articleBody "...between Nov 1959 and Mar 1960 at the Columbia 30th St Studio in NY City" } ;
    schema:award <http://g.co/kg/m/018xpp> ;
    schema:byArtist <http://g.co/kg/m/053yx> ;
    schema:producer <http://g.co/kg/m/01vm8b> , <http://g.co/kg/m/02wvrn5> .
  <http://g.co/kg/m/018xpp> schema:name "Grammy Hall of Fame" .
  <http://g.co/kg/m/053yx> schema:name "Miles Davis" .
  <http://g.co/kg/m/01vm8b> schema:name "Teo Macero" .
  <http://g.co/kg/m/02wvrn5> schema:name "Irving Townsend" . }
```

Fig. 6.2.0. Strutturazione dei dati ricavati dalla 6.1.9 in RDF.



Fig. 6.2.1. Visualizzazione grafica della strutturazione dei dati ricavati dalla 6.1.9 in RDF.

del nodo principale di sinistra portano anche ad altri nodi, di forma ellittica, i quali costituiscono altre risorse con a loro volta altre proprietà ed attributi. I dati sono quindi decomposti quasi anatomicamente in un sistema di triple in cui, tuttavia, non è possibile avere connessioni dello stesso tipo tra la stessa coppia di nodi perché ciò rappresenterebbe nel modello esattamente la stessa tripla, senza ulteriori informazioni. Inoltre, non è possibile qualificare cioè assegnare attributi alle istanze¹⁰.

La rappresentazione di base a grafo, consente, in conclusione, di esplorare dati estremamente connessi in tempi decisamente ridotti e modalità più agevoli di quanto consentito dai tradizionali database relazionali. L’impiego di URI e triple RDF nella modellazione dei dati, costituisce la chiave di interconnessione tra le risorse del corpus informativo, all’interno della grande rete del web semantico, nonché la possibilità di “consumare” e “fare cose intelligenti” con tali dati, da parte di Intelligenze Artificiali¹¹. La strutturazione e pubblicazione di dati in un formato con una semantica ben definita consente alle macchine di inferire connessioni tra le risorse in modo veloce, multilivello e globale, intrecciando fonti eterogenee e ampliando di fatto il sapere.

Note

- <https://neo4j.com/developer/graph-db-vs-rdbms/>
- Maier, D., Theory of Relational Databases, Computer Science Press, Rockville, 1983.
- <https://sdtimes.com/databases/guest-view-relational-vs-graph-databases-use/>
- Codd, E. F., “A relational model of data for large shared data banks”, Magazine Communications of the ACM, 1970, 13 (6). Pp. 377-387.
- Griffiths Selinger, P., Astrahan, M. M., Chamberlin, D. D., Lorie, R. A. e Price, T. G., “Access path selection in a relational database management system”, Proceedings of the

ACM SIGMOD international conference on Management of data, 1979. Pp. 23-34.

6 Robinson, I., Webber, J. E Eifrem, E., Graph Databases. New opportunities for connected data, O'Reilly Media, Sebastopol, CA, seconda edizione, 2015. Capitolo 1.

7 L'argomento è affrontato nel capitolo 3, paragrafo 3.3.3.

8 Tale caratteristica è un elemento che differenzia il database a grafo RDF, basato su triplette, da quello utilizzato nella ricerca, Neo4j, di tipo labeled property (capitolo 11, paragrafo 11.2.2).

9 L'esempio è riportato dal prof. Jesús Barrasa, in occasione della relazione tenuta a San Francisco al Graph Connect nell'ottobre del 2016 e riportata in <https://neo4j.com/blog/rdf-triple-store-vs-labeled-property-graph-difference/>.

10 Codeste limitazioni del modello di dati RDF, sono affrontati e superati da altri tipi di database a grafo descritti nel capitolo 11, al paragrafo 11.2.2.

11 Così Tim Berners-Lee, Jim Hendler e Ora Lassila descrissero la loro visione di Internet, del web semantico e del modello RDF (capitolo 3, paragrafo 3.3.3), rendendo esplicita l'enorme potenzialità di un sistema di connessione tra le risorse tale da poter essere automaticamente interpretato da Intelligenze Artificiali.

PARTE TERZA

Formalizzazione e sperimentazione del protocollo di annotazione semantica.

Il caso studio della Certosa di Padula

CAPITOLO SETTIMO

La Certosa di San Lorenzo, a Padula nel contesto della
tipologia architettonica del monastero certosino

7.1 Accenni sull’Ordine certosino di San Bruno

Nato in Francia nel 1084, in occasione della fondazione a Grenoble della prima certosa, la *Grande Chartreuse*, ad opera di San Bruno, l’ordine Certosino costituito dal fior fiore della nobiltà e della intelligenza, votato principalmente alla spiritualità e alla meditazione.

I compagni di San Bruno vissero i primi decenni senza avere una regola scritta, ma seguendo le consuetudini fissate gradualmente dall’esperienza¹, in uno spirito monastico improntato all’eremitismo ma stemperato da rituali cenobitici. Per preservare l’equilibrio tra i due stili di vita, in seno all’Ordine, i monaci si dividono in due gruppi: i Padri, dediti alla preghiera e alla meditazione, chiusi nella più rigida clausura; e i Conversi² (o Fratelli) certosini a tutti gli effetti, dediti alle relazioni pubbliche e alla sussistenza dei compagni, rinunciando così al completo isolamento.

Guida di ogni monastero è il Priore, colui che precede il cammino, eletto a scrutinio segreto dalla comunità dei monaci. A lui affidata la direzione spirituale del cenobio, coadiuvato nella sua missione dal Padre Vicario, dal maestro dei novizi e dal Padre Procuratore. Incaricato della amministrazione dei beni della certosa, il Procuratore è esentato dalla stretta clausura e spesso, in ragione della consistenza del patrimonio monastico, affiancato da altri Padri. Ai Fratelli Conversi e ai Padri del Coro si uniscono i Fratelli Donati, monaci impegnati in una vita del tutto simile a quella dei Conversi, ma con legami meno stretti verso l’Ordine in quanto non pronunciano i voti religiosi, ma “donano” soltanto la loro vita al servizio dei certosini,



Fig. 7.1.1. Stemma dell’ordine certosino: un globo sormontato da una croce e recinto da una cerchia di sette stelle.

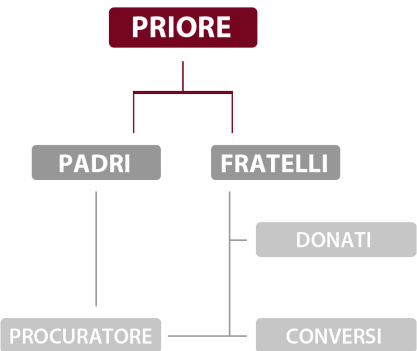


Fig. 7.1.2. Struttura dell'Ordine certosino.

ottenendo qualche dispensa alla Regola. Nell'Ordine certosino la formazione dei Fratelli Conversi e dei Padri è uguale: un postulato che va da tre mesi a un anno, un noviziato³ di due anni, la professione temporanea di tre anni, rinnovata poi per altri due, cui segue la professione solenne perpetua.

Oltre all'applicazione di una vita di continua preghiera, di adorazione, lode e intercessione, in un austero clima di solitudine, la finalità della vita certosina l'amore, non solo verso Dio, la sua gloria e le sue imperfezioni, ma anche verso i fratelli e la salvezza eterna delle loro anime, la concordia e la pace tra i popoli. Questo amore si traduce nella beneficenza dei certosini⁴ e si estende a tutte le opere di Dio, a tutto il creato, dalle bellezze della natura⁵ fino ad arrivare all'arte⁶. E' questo un aspetto che contraddistingue l'Ordine dei certosini, dal carattere profondamente colto⁷ e fortemente transnazionale, influenzato dagli innumerevoli viaggi che i Padri Priori - accompagnati da altri membri della comunità - effettuavano⁸ attraverso l'Europa, partendo dalle loro sedi alla volta di Grenoble⁹, con varie tappe di certosa in certosa, promuovendo in questo modo un profondo scambio culturale. Divenne anche frequente l'uso di nominare priori e padri visitatori¹⁰ di nazionalità estranea a quella della certosa cui venivano preposti, così come invalso rimase l'uso di frequenti scambi dall'uno all'altro monastero di conversi, veicolando in questo modo le tecniche di lavorazione artistica, e rendendo frequente l'uso di servirsi in contemporanea di artigiani locali e di grandi artisti.

7.2 La tipologia architettonica della Certosa

7.2.1 Fondamenti teorici

La struttura architettonica delle certose differenzia nettamente il monastero certosino dagli altri complessi religiosi, incardinata in un profondo intreccio tra forme plastiche e vita quotidiana dei monaci.

Diversi studi mostrano come l'architettura di una certosa sia perfettamente rispondente alle prescrizioni della regola che disciplina la vita delle comunità monastiche certosine, acquistando, in virtù di ciò, quei tratti caratteristici che la distinguono da qualsiasi altro monastero. Alla base dell'architettura delle certose, c'è un concetto fondamentale: la solitudine. Se la contemplazione è lo scopo finale della vocazione del certosino, essa può avvenire solo in una rigorosa e tendenzialmente totale solitudine, intesa non più, come per i benedettini o i cistercensi, soltanto quale

separazione dal mondo dell'intera famiglia monastica, che continua però la vita in comune entro i limiti del chiostro. La solitudine certosina si spinge ben oltre, nella separazione dei singoli, affinché ognuno possa incontrarsi liberamente e unicamente con Dio. Di conseguenza, tale solitudine deve essere esaltata e difesa innanzitutto architettonicamente. La cella diventa allora l'elemento essenziale del monastero, non solo nella sua concezione ideale, ma anche e soprattutto nella sua struttura architettonica¹¹. L'isolamento di questo luogo, in cui il monaco vive solo con sé stesso e con Dio, condiziona l'impianto di qualsiasi certosa, in qualsiasi epoca e in qualunque regione venga costruita. Ma affinché la solitudine diventi proficua, essa oltre ad essere difesa deve anche essere temperata. È in questo senso che un contorno di usanze cenobitiche si inserisce nell'istituzione certosina divenendo uno dei suoi tratti caratteristici. Il certosino, infatti, non è lasciato solo a sé stesso ma vive nell'ambito di una vera e propria comunità, che per mantenersi unita deve sottoporsi a una regola. Spetta alla regola, dunque, mantenere la coesione della comunità e dirigere la vita del singolo monaco in vista del suo equilibrio interiore, temperando il principio della vita solitaria, del silenzio, del digiuno, i quali, se praticati troppo austeramente, possono provocare un danno spirituale. La certosa diventa quindi simbolo di una città ideale, nella quale tutto doveva essere ordinato anche architettonicamente¹². Occorreva un piano come per costruire una città¹³, e rispettare norme, consuetudini ed esempi precedenti.

Per il primo secolo di vita dell'Ordine non è possibile parlare dell'esistenza di una architettura definibile in senso stretto come certosina. L'impossibilità di conoscere gli esempi primitivi¹⁴, la conoscenza frammentaria di quelli successivi, per lo più fagocitati da ricostruzioni successive, la stessa deperibilità dei materiali impiegati¹⁵, sono alla base dell'impossibilità di definire una tipologia certosina del primo secolo di fondazione. Le *Consuetudines* che Guido di Saint Roman elaborò tra il 1121 e il 1127 e che costituiscono la prima base formalizzata della vita dei certosini, pur elencando vari edifici e la loro specifica funzione nei ritmi della vita monastica, non danno nessuna prescrizione riguardo all'impianto generale. Nel panorama di studi incentrati sull'organizzazione architettonica delle certose¹⁶, l'ultimo contributo di rilievo è quello del 1983 di Jean Pierre Aniel che nella sua opera *Les maisons des Chartreux. Des origines a la chartreuse de Pavie*¹⁷ tenta di suddividere la storia degli edifici dell'Ordine in tre periodi distinti, che arrivano fino agli inizi del XIII secolo. Il primo dalla fondazione della Grande Chartreuse fino alla redazione delle *Consuetudines* (1121-1127), il secondo fino alla riunione del primo Capitolo Generale (1140) e il terzo, infine, fino agli inizi del XIII secolo.

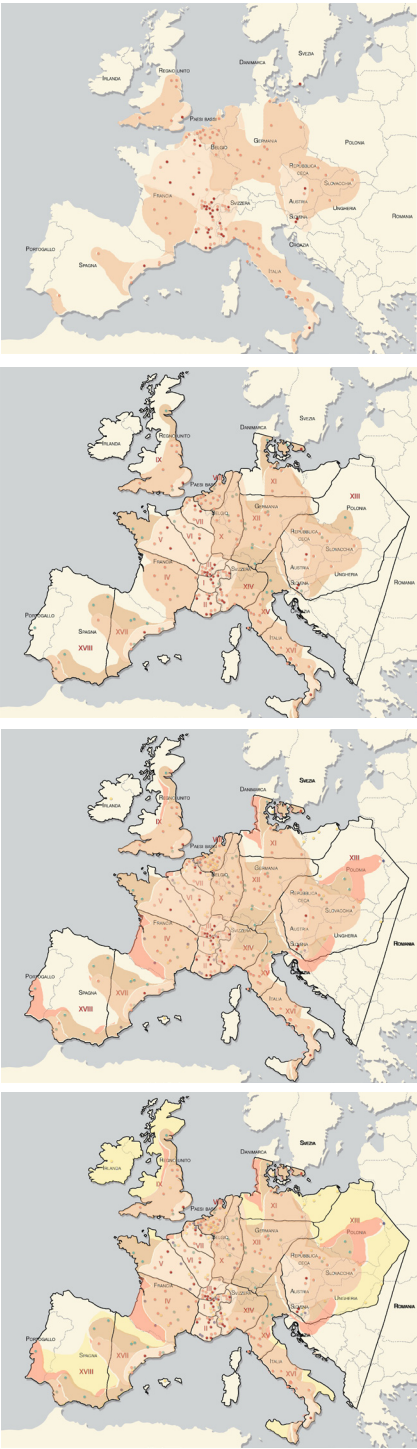


Fig. 7.1.3. Diffusione dei monasteri certosini in Europa: dall'alto verso il basso, dal XI al XIV sec.; dal XV al XVI sec.; dal XVII al XVIII sec.; dal XIX al XX sec.

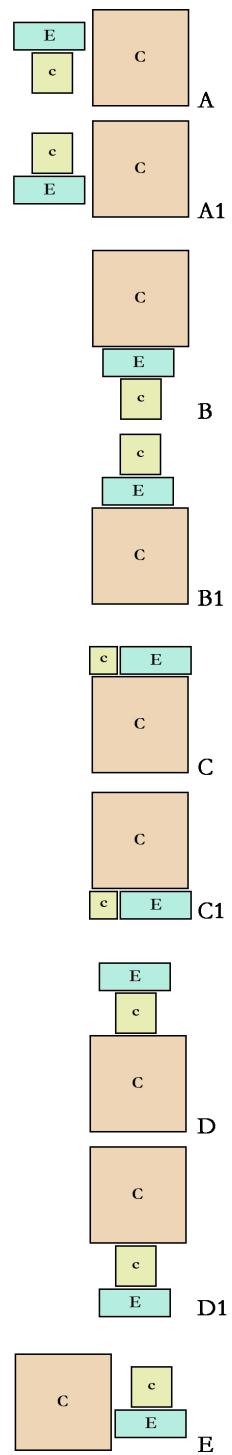


Fig. 7.1.4. Le cinque tipologie architettoniche del monastero certosino, secondo J. P. Aniel. Con la lettera E, è indicato la chiesa, con la C il chiostro grande e con la c il chiostro piccolo.

L'Aniel, sulla scia di quanto già proposto da Marijan Zadnikar elabora cinque tipologie architettoniche (Figura 7.1.4), contraddistinte da una differente disposizione degli elementi considerati centrali per il monastero certosino: il piccolo e il grande chiostro in rapporto alla chiesa. Quattro delle cinque tipologie presentano anche una variante speculare. Per il primo periodo l'autore indica la presenza di tre schemi ed una variante speculare (A, A1, B, C,) mentre per il secondo periodo una maggiore attestazione dei tipi A, A1, B.

Al tipo A¹⁸ appartengono le certose di Portes, Le Reposiur, Selignac, Valbonne e le due certose italiane piemontesi di Casotto e Montebenedetto. Alla variante A1¹⁹ appartengono le certose di Les Ecouges, Val Dieu e forse la seconda redazione della Grande Chartreuse.

Al tipo B²⁰, secondo l'Aniel, appartiene la prima Grande Chartreuse²¹, così come le certose di Silve Benite, Arvieres II, Scala Dei, etc.

Nella variante B1 i due chiostri invertono la loro posizione rispetto alla chiesa, come accade a Witham e a Vacluse.

Il tipo C mette sullo stesso asse chiesa e piccolo chiostro, mentre il grande sta a destra e nella variante C1 a sinistra.

La certosa di Pesio rappresenta invece il tipo D con i due chiostri entrambi dallo stesso lato rispetto alla chiesa, in questo caso il destro, mentre la variante D1, rappresentato dalla certosa di Seitz, il blocco dei chiostri è sul lato sinistro.

Il tipo E²², infine, una sorta di ribaltamento del tipo A, colloca il grande chiostro davanti alla chiesa, che ha un piccolo chiostro lungo il fianco sinistro ed è rappresentato dalle certose di Bonlieu e Bertrand.

Oltre all'interessante tentativo di classificazione dell'Aniel²³, allo stesso si deve anche la riconsiderazione di un importante documento che porta a focalizzare con maggiore attenzione la questione dei possibili modelli delle certose, soprattutto l'idea del grande chiostro con gli edifici di abitazione disposti lungo i lati, in definitiva l'unico elemento di novità introdotto negli edifici certosini. All'indicazione delle laure orientali come modelli della certosa, l'Aniel oppone la lettura di un documento della metà del XI secolo, che permette di individuare il ruolo del modello piuttosto nella comunità religiosa di Saint Bernard de Romans²⁴.

Al di là della teorizzazione puntuale dei diversi studiosi, la produzione letteraria in materia permette di concludere che le certose sono una traduzione costante della medesima tipologia²⁵. In quanto città sante, sono urbanisticamente identiche perché una e immutabile nel tempo è la Regola²⁶ e la spiritualità dei certosini. Pertanto, il loro monastero è eretto adottando uno schema planimetrico comune, essenziale conseguenza della

sottomissione alle norme precise e tassativamente applicate degli Statuti. Prova inconfutabile che ogni certosa uguale a tutte le altre, dal punto di vista della distribuzione degli spazi è, del resto, la *Galerie des Cartes*²⁷: una esposizione di circa 70 immagini di certose (Figg. 7.1.5 e 7.1.6), selezionate tra le 250 esistenti all'epoca e disseminate in tutto il territorio europeo²⁸. La galleria mostra, attraverso le raffigurazioni la pratica, quando si progettava una nuova certosa, di condurre gli architetti e i costruttori a colloquio con i padri delle certose già esistenti²⁹, per fare esperienza delle architetture costruite. Tuttavia, sebbene la Regola imponesse una composizione degli spazi rispondente ai rituali religiosi, nessuna certosa fu copia dell'altra per varie motivazioni: invalse sempre il principio di adattamento alla morfologia del terreno sul quale il monastero doveva sorgere; la maestosità del complesso era strettamente dipendente dalle capacità architettoniche e artistiche delle maestranze locali; il gusto dell'epoca e la disponibilità di materiali costruttivi indirizzavano il progetto generale.

La tipologia architettonica della certosa, pertanto, venne di volta in volta personalizzata, legittimata dalla condizione che ogni casa era realmente indipendente dalle altre, compresa la casa-madre.

Ogni certosa, infatti, si è sottomessa fin dalla metà del XII secolo al capitolo generale che si riunisce ogni anno alla Grande Chartreuse, ma soltanto per quanto concerne la disciplina. Anche dal punto di vista delle risorse economiche e finanziarie, ogni casa era del tutto autonoma, e anche questo ebbe particolare influenza sulla impostazione dei singoli progetti, e soprattutto, ogni fondazione nuova non veniva popolata da monaci provenienti da altre certose, come succedeva con i cistercensi, ma il capitolo generale o il reverendo padre³⁰ vi inviavano soltanto pochi religiosi (due o tre) perché ne guidassero i primi passi e formassero i nuovi monaci che ben presto normalmente affluivano.

7.2.2 Nuclei architettonici e loro vocazione

Ogni certosa si articola intorno a tre nuclei architettonici, strettamente collegati tra loro, corpi distintivi e irrinunciabili di ogni monastero certosino³¹:

- la chiesa;
- il piccolo chiostro con la sala capitolare e il refettorio;
- il chiostro grande con le celle.

Questi nuclei sono raggruppati in due aree in cui è possibile dividere



Fig. 7.1.5. Veduta d'insieme della certosa di Marsiglia, tratta dalla Galerie des Cartes.

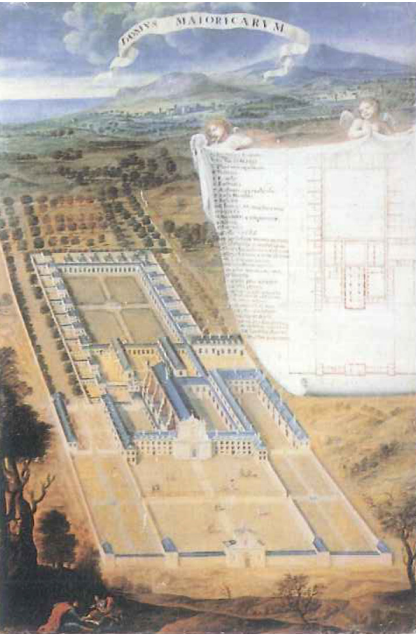
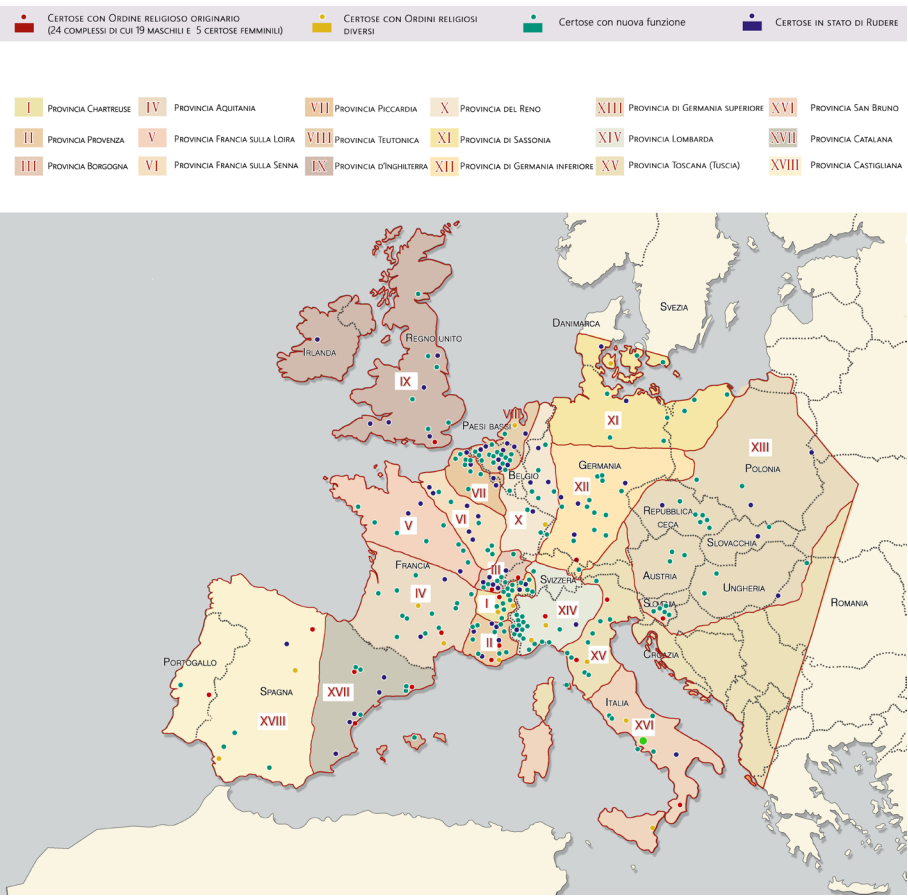


Fig. 7.1.6. Veduta d'insieme della certosa di Mallorca, tratta dalla Galerie des Cartes.

Fig. 7.1.7. Nel 1369 il Capitolo Generale divide il continente europeo in 18 province certosine. Sulla cartografia sono indicate anche le attuali destinazioni d'uso delle certose.



ogni monastero dell'Ordine: la “Casa Alta” e la “Casa Bassa”. La prima corrisponde alla zona eremitica, dove abitano i Padri, con il grande chiostro di clausura e le celle dei monaci; la Casa Bassa, invece, individua la zona cenobitica³², frequentata sporadicamente dagli stessi Padri e più frequentemente dai Conversi.

Il centro della Casa Alta, dal punto di vista funzionale, è il *grande chiostro*: generalmente aperto e sostenuto da colonne nei paesi caldi, chiuso con aperture di finestre nei paesi di clima freddo. Se la certosa è figura della Gerusalemme Celeste - meta finale del certosino che contempla - non è difficile trasporre la simbologia³³ della città celeste dal monastero in genere ad alcuni suoi luoghi particolari, come il chiostro, con la sua forma quadrata e le aperture al centro di ogni lato. Ben presto invalse l'uso, pur di non origine certosina, di denominare i chiostri con il nome di “*galilea*”, “*galilea maior*” e “*galilea minor*”, uso che si protrasse almeno sino al XV-XVI secolo³⁴. Per Dionigi il Certosino, Galilea esprime la vita contemplativa che consiste nel passaggio spirituale

dalle cose visibili a quelle invisibili. E il chiostro per il certosino è anche realmente un semplice passaggio: egli non può trattenervisi, perché la sua residenza è nella cella. Dal chiostro il monaco passa essenzialmente soltanto per recarsi, al riparo dalle intemperie, nei luoghi di vita comune, come la chiesa³⁵.

La *Chiesa* è sempre ad aula unica, canonicamente divisa in due³⁶ tra zona dei monaci e quella dei fratelli conversi, con annesse una serie di cappelle fornite di numerosi altari per concelebbrare le messe. È il luogo sacro per eccellenza, in cui la relazione tra edificio materiale e Gerusalemme suprema si stabilisce con maggior forza. La chiesa di una certosa non è solo figura della Gerusalemme futura, ma nelle sue strutture architettoniche è fatta a immagine del tempio biblico di Salomone: il coro dei conversi corrisponde al vestibolo, il coro dei monaci al Santo e il santuario (detto *Sancta Sanctorum*) al Santissimo.

La *Sala del Capitolo*, dopo la chiesa è il luogo più importante della casa³⁷. Qui la domenica e i giorni festivi, i Padri e i Fratelli si riuniscono per ascoltare la lettura del Vangelo e degli Statuti e per pregare secondo le intenzioni indicate dal Priore.

L'incontro di Padri e Conversi matura anche nel *Refettorio*, utilizzato soltanto nei giorni di festa e di domenica o in occasione di visite di nobili personaggi. È il luogo in cui i certosini consumano il loro pasto³⁸ in comunione.

A questi ambienti, se ne aggiungono altri, così da conformare l'architettura complessiva del cenobio certosino.

Attorno al grande chiostro sono situate le *celle dei Padri*, una sorta di piccole casette³⁹, le cui porte s'affacciano, ad intervalli regolari, lungo i corridoi del chiostro (Figura 7.1.9). La cella, in realtà, è un piccolo romitaggio, una casetta a più vani con attiguo un giardinetto. È costruita in modo tale che da nessuna parte delle sue finestre possa essere vista la cella di un altro confratello. Ciascuna è contraddistinta da una lettera dell'alfabeto e spesso anche da una sentenza scritturistica affissa alla porta. A fianco della porta d'entrata c'è uno sportello - la ruota della clausura - attraverso il quale il monaco eremita ogni giorno riceve i pasti. Essa si articola in spazi esterni - giardino e loggette - e spazi interni - *cubiculum*, studio, oratorio, piccole officine, legnaia. Al piano terreno della cella si trova una legnaia, dove il certosino ammassa, sega e spacca legna da ardere. Nel medesimo vano

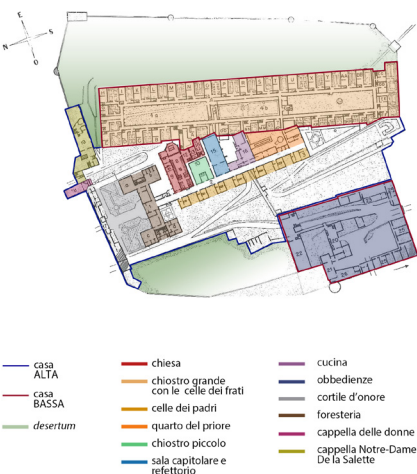


Fig. 7.1.8. Planimetria della Grande Chartreuse presso Grenoble. Individuazione delle funzioni.

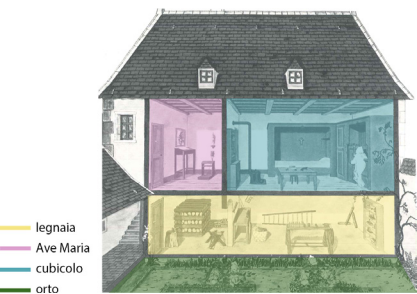


Fig. 7.1.9. Casa del certosino secondo Viollet Le Duc.

c'è un banco e degli utensili da falegname⁴⁰ e anche un tornio a pedale. Accanto alla legnaia e al laboratorio, il monaco ha un piccolo orticello. Non è mai esistita alcuna regola su come coltivare il giardino⁴¹, il suo scopo è dare al singolo un supporto economico. Alla finalità vitale si unisce quella spirituale, legata alla simbologia di ciascun fiore, pianta o erba. L'*hortus* l'Eden, il paradiso terrestre, immagine e prototipo del giardino spirituale, coltura e cultura dell'anima. Il giardino ricorda il soggiorno di Adamo e Eva, il luogo di delizie, l'Eden a cui l'umanità intera tende alla ricerca del "paradiso perduto". Nel giardino crescono elementi floreali e vegetali in qualità aromatiche differenti⁴², specchio della meditazione.

Al piano superiore, dopo una breve rampa di scale, vi sono due stanze. La prima, chiamata "Ave Maria" perché entrando il certosino recita in ginocchio davanti ad un'immagine della Madonna un'Ave, è praticamente un'anticamera da usare come stanza da lavoro, una sorta di vestibolo dotato di altarino con l'immagine della Vergine. La seconda stanza, chiamata "cubicolo", è la principale, il cuore della cella, e funge contemporaneamente da camera da letto, da refettorio, da studio e da oratorio. Il cubicolo ha un mobilio il più semplice possibile: un povero e duro giaciglio con alcune coperte di lana e un cuscino di crine o imbottito di paglia; una stufetta a legna; un tavolino a forma di piccola credenza, collocato nel vano della finestra prospiciente l'orticello, in modo che i pasti vengano consumati a contatto con la natura. In un angolo, accanto al letto, un inginocchiatoio ed uno stallone simile a quello della chiesa, chiamati "oratorio", dove il certosino recita al rintocco della campana, le Ore minori non cantate in coro, e anche l'Ufficio della Madonna e, settimanalmente, quello dei Defunti. Lungo le pareti della stanza alcuni scaffali con i libri per la lettura spirituale, la meditazione e lo studio.

La cella è la Betlemme spirituale⁴³ e diventa il cuore pulsante del monastero certosino: per quanto integrata nel complesso architettonico, essa risulta un organismo autonomo, centro ideale della certosa perché in essa la vita certosina raggiunge il suo culmine⁴⁴.

Tutta l'architettura del monastero contribuisce a esaltare il suo isolamento. Alla cella si può accedere unicamente dall'ingresso posto sulla "galilea maior"; quest'ultima è chiusa su tre lati dalla sequenza di celle e solo mediante il quarto lato trova comunicazione con le zone della vita in comune, "galilea minor" e chiesa, zone in cui si può accedere unicamente oltrepassando la zona delle attività dei conversi, che diventa come un filtro nei confronti del mondo esterno.

Lo schema monasteriale, così dipendente dalle direttive dell'Ordine, prevede anche attività pratiche, di economia rurale ed artigiana, compiute

dai Conversi e che richiedono la presenza di diversi fabbricati atti a tale scopo. "domus inferior", solitamente distinta e distanziata dal monastero vero e proprio, la "domus superior", alla quale i Fratelli si recano solamente la domenica e nelle solennità.

Animata da stalle, forni, laboratori artigianali⁴⁵, la Casa Bassa ospitava, in origine, le dimore degli stessi Conversi che ivi svolgono le loro attività spirituali e materiali. I fratelli Conversi ricoprono un ruolo, nel mondo certosino, che li fa fungere da filtro, da barriera, fra i Padri, i "Religiosi di Coro", ed il mondo. Con questi condividono, con uguali diritti e doveri, la stessa vocazione, ma sotto forme diverse⁴⁶. Trascorrendo molte ore del loro tempo fuori dalla cella, all'aria aperta, i Conversi non è necessario che abbiano per abitazione una casetta con quattro vani e giardinetto come i Padri. La "domus inferior" è quindi l'abitazione, il centro di attività e di spiritualità dei Conversi la cui vita è totalmente sperata da quella dei monaci e oggetto di un severo regolamento.

Se il monastero è considerato un luogo di spogliazione esterna in cui Dio può meglio parlare al cuore dell'uomo, così il monastero certosino cerca di isolarsi anche materialmente in un "*desertum*"⁴⁷ che deve circondare tutte le certose, anche quelle costruite vicino alle città, per rendere tangibile il loro isolamento e la loro separazione dal mondo. Una lunga cinta muraria, denominata "clausura", circonda tutto il monastero inglobando terreni, adibiti a campi ed orti, e definendo così ben tangibilmente l'isolamento dell'intero complesso. una vera e propria cittadella monastica, il cui schema fondamentale si è ripetuto nella realizzazione delle circa 270 certose che sono state costruite nel corso della storia.

7.3 La Certosa di San Lorenzo, a Padula

7.3.1 Evoluzione storica

Fondata nel 1306 da Tommaso di Sanseverino, conte di Marsico, la certosa di Padula ingloba le architetture di una grancia virginiana, detta di San Lorenzo, da cui prese il nome.

Il Sanseverino, all'epoca signore del Vallo di Diano, condusse una complessa operazione diplomatica per l'acquisizione, dall'abbazia di Montevergine, della proprietà della grancia, sita a valle del paese di Padula. L'operazione si concluse, in prima battuta, il 14 ottobre 1305 con la stipula di un atto di permuta in cui il nobile signore cedeva ai virginiani alcune proprietà nel territorio del castello di Sanseverino. In questo luogo venne realizzato il

Fig. 7.2.0. Certosa di San Lorenzo, vista del chiostro grande con il cimitero nuovo.



monastero⁴⁸. L'atto di fondazione e donazione della certosa fu confermato, successivamente, dal re Carlo II lo Zoppo il 27 aprile dell'anno successivo, mentre il 16 settembre l'abate di Montevergine concesse alla Certosa di Padula anche la chiesetta di San Lorenzo, non ancora ceduta con l'atto di permuta del 1305, sebbene fosse parte integrante della grancia virginiana preesistente.

on furono la devozione e la pietà religiosa a spingere il conte di Sanseverino a realizzare la certosa, la cui erezione interpretata piuttosto in termini politici. Quello certosino è un ordine francese che non poteva non essere gradito al sovrano angioino di cui il conte Sanseverino era un fedelissimo. Il casato fu sempre al fianco dei sovrani francesi nelle battaglie e l'insediamento dell'ordine certosino nel Vallo era strategicamente importante nella difesa del Regno, per contenere la risalita dei siciliani e degli Aragonesi delle Calabrie. La lettura politica della fondazione del monastero trova, poi, conferma nel conferimento, di lì a poco, al nobile signore della carica di connestabile del Regno da Carlo II lo Zoppo e quella di reggente ai tempi di Roberto che succedette a Carlo sul trono di Napoli.

La connessione tra religione e politica, tra ordine certosino e Angioini, è d'altra parte documentata dal fiorire di numerose altre certose durante tutto il XIV secolo. Alla fondazione della Certosa di Padula, fecero seguito quella di San Martino a Napoli (nel 1325), quella di Chiaromonte in Basilicata (nel 1334), quella di Guglionesi nel Molise (nel 1338) e quella di Capri (nel 1356). I fondatori di queste certose furono sempre i reali⁴⁹, o personaggi della nobiltà napoletana⁵⁰ collegata agli Angioini.

Oltre alla ragione politica, la fondazione del monastero di San Lorenzo ha ragioni anche pratiche. Il vallo era, nell'alto medioevo, una campagna paludosa e malsana; lo stesso toponimo "Padula" indica un territorio di acque stagnanti e di corsi d'acqua lenti e non regolamentati. I romani riuscirono nell'opera di bonifica garantendo con le chiuse di Polla il

deflusso regolare del corso del Tanagro che rese possibile il sorgere delle città, in pianura, e la coltivazione delle campagne. Con la caduta dell'Impero Romano e la conseguente perdita della sua efficiente organizzazione tecnica e amministrativa, le paludi tornarono ad invadere la pianura. Gli abitanti presero quindi a rifondare le città sui fianchi delle colline che chiudevano il Vallo, e solo sul finire del XIII secolo e all'inizio di quello successivo, gli Angioini ed i potenti principi Sanseverino intrapresero con decisione opere di bonifica della zona che portarono, poi, alla fondazione del complesso monastico⁵¹ certosino.

Della fase originaria della costruzione della certosa⁵² resta l'impianto iconografico d'insieme, i colonnati di alcune logge delle celle dei Padri e del chiostro mutilo adiacente al refettorio, le volte ogivali della chiesa e delle cappelle laterali. Di sicura datazione trecentesca è la porta della chiesa monastica, dove la data (1374) è scolpita in caratteri gotici.

Dell'inizio del '400 può essere il bassorilievo in pietra murato lungo le scale che portano alla foresteria e forse alla seconda metà del secolo può collocarsi la scala a chiocciola che conduce alla biblioteca. Agli inizi del '500 sono datati i due cori della chiesa, quello dei Padri e quello dei Conversi.

il Concilio di Trento, che vengono registrati i lavori più consistenti di radicale trasformazione del complesso monumentale. Le ragioni sono da relazionarsi all'aumentata potenza dei certosini di San Lorenzo, dovuta ai numerosissimi donativi ottenuti per volontà e con l'appoggio del potere papale, conscio di trovare, in un ordine quale quello dei certosini, un solido punto fermo. A quest'epoca risale la costruzione del chiostro della foresteria con portico e loggia, forse quella della loggia dell'appartamento del priore e del prospetto della chiesa delle donne, l'impianto della torre degli armigeri e infine quello della facciata principale della certosa, in seguito arricchita da elementi scultorei e decorativi che ne hanno fatto ipotizzare una datazione settecentesca.

Nel '600, la Certosa del Vallo di Diano si arricchisce con notevoli arredi sacri ordinati all'argentiere Gennaro Monte⁵³ e si avviano i lavori al chiostro grande, probabilmente di ampliamento e ristrutturazione di un preesistente chiostro già utilizzato come fulcro della zona di più stretta clausura. L'impostazione dell'impianto della galilea maior ricorda le realizzazioni di Giovanni Antonio Dosio impegnato in quegli stessi anni per la Certosa di San Martino. La presenza del Dosio a Padula però non è documentata, così come non lo è quella di Cosimo Fanzago che, tra il 1623 e il 1653, proprio negli anni in cui è registrata la prosecuzione dei lavori del chiostro grande di San Lorenzo, lavorava a pieno ritmo per i certosini di San Martino. È innegabile, tuttavia, che motivi tipici del linguaggio

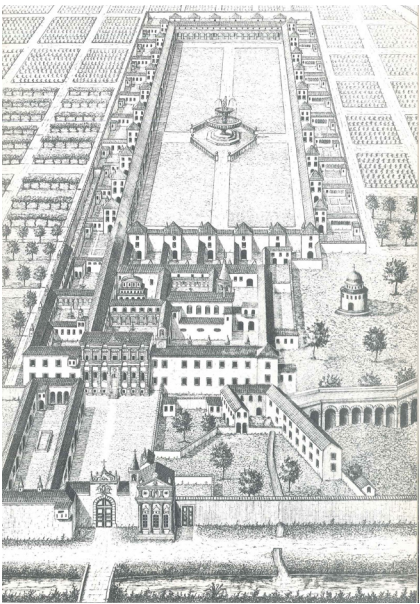


Fig. 7.2.1. Veduta a volo d'uccello della Certosa di Padula del secolo XVIII (antecedente al 1730). Si noti la rappresentazione della passeggiata coperta del chiostro grande.

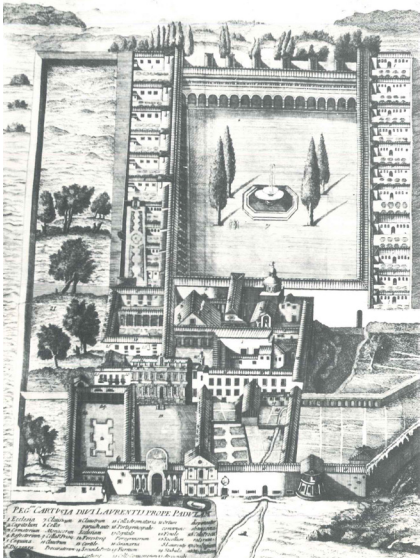


Fig. 7.2.2. Veduta a volo d'uccello della Certosa di Padula del 1763. Si noti la raffigurazione del porticato a un solo livello del chiostro grande.

fanzaghiano siano presenti in alcuni particolari costruttivi e decorativi del chiostro in questione come la pavimentazione, in marmo battuto, dei bracci porticati e la tipologia del cimitero dei monaci.

Una nuova e decisiva fase costruttiva per la Certosa di Padula si verificò nel corso del secolo XVIII. La maggior parte degli studiosi a scindere gli interventi del '700 in due filoni: nel primo, esteso sino agli anni Trenta, si ritiene che i lavori siano da ascrivere ad un architetto napoletano ancora legato alle tematiche rococò. A questo periodo sono ascrivibili la costruzione ex novo dell'odierno refettorio e la rifunzionalizzazione di ambienti prima diversamente utilizzati. Per il secondo filone, comprendente gli interventi operati dopo il 1737, si considera autore Ferdinando Sanfelice⁵⁴. Gli ambienti in cui si ravvisano segni sanfeliciani sono il chiostro del cimitero antico, il chiostro dei Procuratori, l'elevazione del chiostro grande con la realizzazione della passeggiata coperta per i monaci e lo scalone monumentale, di collegamento tra i due livelli del chiostro⁵⁵.

Con queste edificazioni si conclude la stagione d'oro del cenobio. A causa ed a seguito delle soppressioni dell'inizio del XIX, molti manufatti d'arte della Certosa di San Lorenzo partirono alla volta di Napoli. Presso l'Archivio di Stato di Salerno è conservato un documento datato 15 luglio 1813⁵⁶ che dà conto delle operazioni di imballaggio e trasporto del grande ciborio bronzeo e michelangiolesco del monastero alla volta del Reale Museo borbonico di Napoli. A differenza del ciborio, numerose altre opere della Certosa non sono mai tornate in sede: i reliquiari e le preziose statue d'argento di Gennaro Monte e di Giandomenico Vinaccia, fusi alla Zecca di Napoli; migliaia di volumi, in parte rintracciabili alla Biblioteca Nazionale di Napoli; tutta la straordinaria raccolta di sigilli, cammei, monete e varie curiosità del museo del Priore e tantissimi dipinti di piccole e grandi dimensioni⁵⁷. Dopo il decennio francese i monaci, rientrati nella Certosa, si trovarono di fronte alle grandi cornici di stucco vuote, nella chiesa, nel refettorio, nel capitolo, nel tesoro e si rivolsero direttamente al Re nel tentativo, fallito, di riacquisirle⁵⁸.

Nel 1866, dopo l'Unità d'Italia, l'Ordine fu nuovamente soppresso e i monaci dovettero nuovamente lasciare, per l'ultima volta, la Certosa, dichiarata nel 1882, con decreto del Ministero di Grazia e Giustizia, monumento nazionale. Durante le due guerre mondiali della prima metà del Novecento, essendo l'intero complesso un luogo abbandonato e inutilizzato, fu usato come campo di prigionia e di concentramento. Dal 1957 alcune sale ospitano il museo archeologico provinciale della Lucania occidentale, che raccoglie una collezione di reperti provenienti dagli scavi delle necropoli di Sala Consilina e di Padula, dalla preistoria all'età

ellenistica. Soltanto nel 1982, presa in consegna dalla Soprintendenza ai Beni Ambientali, Artistici e Storici di Salerno, sono stati intrapresi lavori di restauro che hanno consentito alla Certosa di diventare uno dei siti maggiormente attrattivi della Campania e, dal 1998, Patrimonio Mondiale dell'Umanità dell'UNESCO⁵⁹.

Grazie alle opere di restauro sono stati riportati alla luce: l'acciotolato della grande corte esterna centrale, la graticola dei viali del desertum, antiche stoviglie dei Padri, gli archi dell'acquedotto che portava acqua ai mulini, i forni. Sono state ricostruite anche le fontane e ritrovati quadri e cibori.

7.3.2 L'architettura del cenobio

La Certosa di Padula, con una superficie di 5100 metri quadrati fra spazi coperti, chiostri, cortili e giardini, è il più grande e monumentale monastero dell'Italia Meridionale.

La sua struttura architettonica, nella successione degli spazi scansione quasi ritmica degli ambienti, corrisponde esattamente all'organizzazione religiosa e amministrativa del monastero certosino ideale.

Un lunghissimo *muro di cinta*, attrezzato anche a difesa verso l'esterno con la Torre degli armigeri, cinge non solo il costruito ma anche lo spazio verde, interdetto agli estranei, dove erano gli orti e i campi coltivati. Lungo la recinzione, risistemata nel 1718, si apre un poderoso portale, anch'esso ristrutturato nel '700 e successivamente alterato, recante sulla chiave di volta lo stemma dell'Ordine certosino. Dal portale, si accede al *cortile d'Onore*, un grande vaso rettangolare, delimitato da tre braccia di fabbriche. Qui vi prospettano i locali di servizio funzionali alla vita della Certosa, con depositi, granai, stalle, frantoio, mulini e scuderie. Nel braccio ove si apre il portale di ingresso alla corte, sono situate: (i) la cappella della Maddalena, all'estremità orientale; (ii) la chiesa dedicata a San Lorenzo e aperta alle donne, dalla facciata rigidamente impostata sulla simbologia della graticola del martirio del Santo; (iii) la spezieria, ad uso dei certosini e dei fedeli, decorata da affreschi settecenteschi. Ai lati, la piazza è cinta dal braccio con le abitazioni dei Conversi, cui è addossata una fontana a grottesche detta "dei cavalli", e da quello con le stanze dell'Ospizio per i pellegrini. Arricchita da altre due corti laterali, rispettivamente la corte della spezieria e la corte dei granai, la piazza centrale con i suoi edificati definisce la Casa Bassa della Certosa di Padula. Limite della domus inferior è la *facciata principale*, che domina lo spazio della vita aperta alla collettività, segnalando con la sua maestosità l'ingresso ingresso alla



Fig. 7.2.4. Chiostro della foresteria nobile della certosa di San Lorenzo.

“reggia del silenzio”. Realizzata nel Cinquecento in pietra locale, ma arricchita da sculture e coronamenti nel secolo XVIII, la facciata immette nella zona più propriamente conventuale dove, oltre gli ambienti di più stretta clausura, si ritrovano anche quelli di rappresentanza e quelli destinati alla vita comunitaria sporadicamente accessibili ad alcuni nobili visitatori. Varcata la soglia, si accede alla zona cenobitica della certosa, luogo degli “effimeri abbandoni”. Qui vi si ritrovano ben quattro chiostri, singolarità e peculiarità del monastero del Vallo. Il primo, posto alla destra del portone di ingresso, è quello della *foresteria nobile*, risalente alla seconda metà del ‘500 e articolato su due ordini con portico ad arcate in pietra e loggiato superiore rivestito d’intonaco a graffiti. Al centro del chiostro, che si aggancia a quello che Giovan Antonio Dosio fece per la certosa napoletana di San Martino, una fontana a vasca sovrastata da un puttino, traguardo visivo dei diversi ambienti che si affacciano sul chiostro: l’appartamento di foresteria, il piccolo refettorio di foresteria e la cosiddetta cappella dei morti, dove i Padri venivano esposti prima di essere interrati nel cimitero del grande chiostro. Dal chiostro della foresteria è possibile anche accedere alla zona delle cucine, ai granai e ovviamente, attraverso la scala interna, alla loggia superiore, dove sono situati altri appartamenti per i nobili forestieri e una cappellina dedicata a Sant’Anna.

Un bellissimo portale in cedro del Libano intagliato a lettere gotiche immette da un angolo del chiostro della foresteria nella *chiesa monastica*. A



Fig. 7.2.3. La corte esterna della certosa di San Lorenzo.

navata unica e ripartita come consuetudine in due zone, quella riservata ai Conversi e quella destinata ai Padri, divise da un alto muro, la chiesa è dominata da alti archi ogivali che ne denunciano la fondazione trecentesca. Sul lato sud si aprono una serie di cappelle laterali: delle S. Reliquie, del SS Crocefisso, Ecce Homo e di San Giovanni Battista. Alle spalle dell’altare maggiore maiolicato, è posta la sagrestia, dominata da un ciborio bronzeo, erroneamente attribuito in passato a Michelangelo.

Sul lato sinistro della chiesa, tramite il vestibolo delle campane, si accede alla *sala del Tesoro*, coperta da una volta decorata da stucchi, molto articolati e fortemente aggettanti, che raffigurano figure angeliche e inquadrano al centro una “Caduta degli Angeli ribelli” dipinta ad affresco. Qui furono trasferiti, nei maestosi armadi in radica di noce, gli argenti che non potevano più essere custoditi in sagrestia.

Un portale in pietra ornato di fregi conduce alla *sala del Capitolo*, quasi ovale, con alta cupola e volta affrescata, probabilmente costruita ex novo nella prima metà del XVIII secolo.

Il nucleo della liturgia religiosa è affiancato dal *refettorio*: qui i Padri mangiavano solo nelle feste comandate o in particolari occasioni. Nonostante la mancanza di grandi dipinti alle pareti, l’ambiente ha l’aspetto di un salone di feste con il pavimento di marmi policromi intarsiati, il pulpito marmoreo sostenuto dall’aquila di San Giovanni Evangelista. Accanto al refettorio, è il *chiostro del cimitero antico*, affine nelle forme e nei decori alla migliore produzione dell’architettura settecentesca napoletana. Come anticipato, il monastero di Padula si contraddistingue per il numero inusuale di chiostri minori. Oltre al citato chiostro della foresteria nobile, subito dopo l’androne d’accesso, si apre su un lungo corridoio il *chiostro dei Procuratori*, ornato da mascheroni e grottesche che decorano sia le paraste, che dal portico al piano inferiore proseguono sino al loggiato superiore, sia nelle quattro piramidi tronche al centro delle aiuole che sono disposte secondo uno schema simmetrico e circondano una fontana ornata da un tritone e da tre delfini. Affacciati sulla loggia superiore, si sviluppano gli appartamenti dei Procuratori, in collegamento con il *quarto del Priore*. L’accesso all’appartamento del Priore, è posto al di là del grande portone della clausura, che segna il passaggio alla Casa Alta dei certosini. Disposto a spina tra la zona cenobitica e quella eremitica, l’alloggio della guida spirituale dei certosini è monumentale ed al contempo lussuoso come deve essere un ambiente destinato alla rappresentanza. Nell’appartamento trovano posto la stretta sala dell’archivio, dove venivano conservati i documenti della certosa, e la ricchissima cappella dedicata a San Michele Arcangelo, decorata di stucchi dorati e dipinti murali. La cella è completata da un ampio giardino,



Fig. 7.2.5. Chiesa monastica della certosa di Padula.



Fig. 7.2.6. Refettorio della certosa di Padula.



Fig. 7.2.7. Chiostro dei Procuratori della certosa di San Lorenzo.

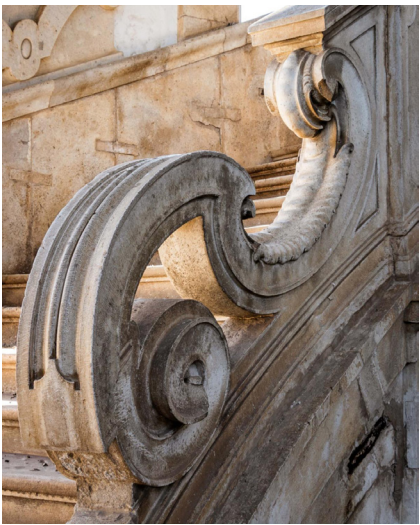
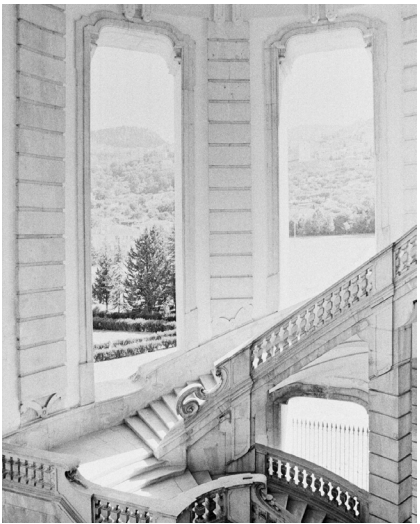


Fig. 7.2.8. Scalone monumentale della certosa di San Lorenzo. Dettagli.

arricchito da due fontane, su cui prospetta una grande loggia, affrescata dallo stesso artista operante al piano superiore del chiostro della Foresteria nobile, e la biblioteca. La scala di accesso, elicoidale, occupa un vano cilindrico e si sviluppa in una sequenza di 38 gradini raccordati, senza l’uso di calce, lungo un asse costituito da un cordolo in pietra.

Simbolo della magnificenza della certosa di Padula è il *chiostro Grande o chiostro di clausura*, che si presenta alla vista dell’uomo appena varcato il portale di clausura. Il punto di inizio è segnato a terra dal disegno pavimentale a stella, che è insieme rosa dei venti (motivo non raro nei pavimenti del barocco napoletano), cerniera che indica l’apertura laterale verso l’invaso spaziale del chiostro, ed emblema di San Bruno e dei suoi seguaci. Si configura come un quadriportico ad arcate sostenute da 84 pilastri dorici giganti in pietra a bozze lisce e ornate da un fregio continuo nella trabeazione recante più di 600 metope con triglifi, scolpite a rilievi di simboli certosini e dottrinali. Lungo i portici si dispiegano le *celle dei Padri*, originariamente in numero di 26, oggi se ne contano 24. Costituite da più di due locali, distribuiti su una doppia altezza, le abitazioni sono provviste di ampi sotterranei e rispecchiano a pieno i dettami della Regola⁶⁰.

A suggellare la magnificenza del chiostro grande con le sue celle è lo *scalone monumentale*, commissionato dall’Ordine nel 1743. Il progetto è attribuibile con buona probabilità a Sanfelice, ma realizzato dopo la sua scomparsa da altri, e quasi certamente, da Gaetano Barba, individuato dalla letteratura artistica quale autore dell’opera. Il portale di accesso allo scalone, con il suo timpano trapezoidale, appare un omaggio alla Porta Pia, opera di Michelangelo, la porta urbana più vicina alla Certosa romana di Santa Maria degli Angeli. Impostato su una pianta ottagonale, lo scalone si sviluppa lungo un percorso ellittico a doppia rampa, sormontato da una cupola anch’essa su matrice geometrica di una ellisse. Si tratta di una struttura quasi interamente traforata e concepita come una sorta di cornice di polittico che inquadra la Sacra Natura del desertum.

Tutto l’impianto architettonico della certosa di Padula è impostato su un *asse prospettico* che attraversa il cenobio per una lunghezza di quasi 350 metri congiungendo il portale di ingresso con lo scalone. L’asse, secondo lo storico Marcello Fagiolo, va prolungato idealmente, al di là dello scalone, verso il parco (a cui si doveva accedere, secondo l’ipotesi, attraverso una scalinata finale) e, al di là del portale d’ingresso, verso il Monumento o Epitaffio del 1749 dedicato a San Bruno. L’ipotesi può essere confortata dalla osservazione del trattamento esterno dello scalone che, solo in corrispondenza della gradinata irrealizzata, appare con una muratura rustica, anziché essere rivestito in pietra come le altre parti

basamentali. Sistemato definitivamente come percorso trionfale con le trasformazioni settecentesche della Certosa, su di esso si innestano i temi religiosi dei certosini, di ispirazione mariana nonché della trasparenza e della permeabilità che caratterizzano dal punto di vista architettonico questo asse che si apre sullo sfondo della natura, immagine della creazione e allegoria del Paradiso.

7.3.3 Il monastero di San Lorenzo nel contesto delle certose campane e i riferimenti alle certose di Spagna

Connessioni tra la casa di San Lorenzo e le certose della Campania possono rintracciarsi fra il ‘600 ed il ‘700. In questo periodo si datano le trasformazioni barocche dei monasteri certosini della regione, in cui si rintracciano sia connessioni che peculiarità tra le Certose di Napoli e Padula con qualche riferimento a Serra San Bruno e Capri.

In questi anni, alcuni artisti vengono coinvolti contemporaneamente⁶¹ in più di una costruzione perpetuando quella unità di intenti che ha da sempre caratterizzato la tipologia delle fabbriche definita dalla rigida Regola monastica certosina. A conferma di ciò appaiono significativi alcuni documenti rinvenuti nell’Archivio Storico del Banco di Napoli, tra questi una bancale⁶², del 1643, a favore del Cavalier Cosimo Fanzago in cui vengono menzionati i Priori dei monasteri di San Martino, Padula e del Bosco (Serra San Bruno) per la realizzazione della “Custodia” dell’altare di Serra San Bruno. A riprova della connessioni fra le certose è del 1695 il versamento, in un’unica soluzione, del Procuratore di Padula per la realizzazione di lavori di ottone eseguiti sia nella propria certosa che in quella di Chiaromonte in Basilicata.

In tempi più remoti i Priori delle Certose di Santo Stefano (Serra San Bruno), di Napoli e di Padula fornirono soccorso economico ai confratelli della certosa di Capri dopo l’incendio causato dall’assalto dei Saraceni nel 1553.

Forti sono, inoltre, le affinità della certosa di San Lorenzo con le certose spagnole, soprattutto per alcuni interventi operati nel XVII secolo quando, sebbene non vi siano documenti a comprovare che a Padula siano giunti Priori o Procuratori provenienti dalla Spagna, furono operate una serie di trasformazioni contestualmente all’assunzione dei certosini a feudatari di metà del Vallo di Diano grazie all’acquisto di titolo e terre da Don Diego D’Avalos nel 1645.

Per la spazialità esterna il riferimento è alla certosa di Siviglia mentre per

gli interni a quella di Granada. In questo caso l’affinità è riscontrabile per alcuni particolari, i cassettonati dipinti delle logge, le porte di molti ambienti, ma specialmente le forme decorative della chiesa. Colpisce il modulo dei due altari addossati al muro divisorio tra coro dei Padri e coro dei Conversi, dalla parte di quest’ultimo, presente a Padula come a Granada. Colpisce la fastosa e movimentata decorazione in stucco bianco e oro con angeli, putti, motivi vegetali, fiori e ghirlande di frutta, e la scansione delle cornici alle pareti dell’unica navata, la teoria delle grandi finestre che si susseguono al di sopra del cornicione, a Padula come a Granada. Un complesso decorativo di esuberante barocchismo messo in essere in entrambi i casi nella seconda metà del secolo XVII - e reso più ricco, poi, nella prima metà del secolo successivo - che provoca una sensazione di agiato dinamismo e di esaltata religiosità. In questo modo il muro divisorio tra il coro dei Padri e il coro dei Conversi, alleggerito da preziose decorazioni di coronamento, non impedisce di essere idealmente, a Padula come a Granada, risucchiati verso la zona presbiteriale ed oltre ancora verso il sacrario, palese a Granada alle spalle del baldacchino dorato in trasparente e dovuto al genio di Hurtado Izquierdo (1710), nascosto a Padula dietro il grande altare maggiore di scagliola e madreperla.

Note

1 La Regola (o Norma) dell’Ordine per i primi decenni veniva tramandata solo oralmente. Tra il 1121 ed il 1127, il Padre Generale Guignes, Priore della Grand Chartreuse, volle descrivere gli usi allora in vigore in un libro che intitolò “Costumi di un certosino” e che costituì la Regola dell’Ordine, approvata poi dal Papa Innocenzo II il 22 dicembre 1133, come “Consuetudines”. Varie revisioni e aggiornamenti (soprattutto in seguito al Concilio di Trento) si ebbero nel corso dei secoli fino a giungere all’ultimo rinnovamento coincidente con il testo tefinitivo del 1975 con il titolo “Statuta renovata Ordinis Cartusienensis”.

2 Questa categoria di monaci, benchè esistente nella Chiesa già prima della fondazione certosina, assume però, per la sua vocazione di vita solitaria individuale e di gruppo, una carattere particolare che le fa esercitare un influsso speciale sull’equilibrio di tutta la vita certosina.

3 Nel secondo anno di noviziato i giovani incominciano gli studi che devono essere ordinati a prepararli alla loro vita monastica e sacerdotale. Essi attenderanno agli studi nella solitudine della cella. Due giorni a settimana renderanno conto degli studi fatti ad un monaco designato dal Priore e ne riceveranno le spiegazioni. Gli studi durano da un minimo di sette anni ad un massimo di nove anni, con almeno due ore di studio al giorno. Il giovane professo, dopo sette anni di formazione, fa la sua professione solenne e perpetua ricevendo l’ordine sacerdotale.

4 Le Certose hanno sempre sentito il dovere di beneficiare, secondo le loro possibilità,

la gente povera e tribolata dei territori circostanti; in momenti di emergenza non hanno esitato a sacrificare la loro amata solitudine e persino la vita dei monaci pur di andare incontro alle necessità materiali del prossimo. Le farmacie dei certosini, presenti in quasi tutte le certose, assolvevano proprio a questo compito: piccoli ospedali di pronto soccorso messi a disposizione allorquando le istituzioni pubbliche non provvedevano ordinariamente ai problemi sanitari, offrendo in forma gratuita ai malati che vi si recavano lo specifico adatto alle loro infermità.

5 Pur così segregato dal mondo, al certosino era raccomandato un passaggio settimanale a contatto con la natura ed ecco perché incorporato alla cella c’è sempre un giardinetto coltivato personalmente, dove poter vivere quotidianamente a contatto con la natura, allietandosi del periodico fiorire del suo orticello e del gradevole avvicinarsi delle stagioni.

6 Nella zona cenobitica delle certose i padri raccoglievano tante opere d’arte e manufatti preziosi praticamente assenti nella zona eremitica, di estremo rigore e monumentalità architettonica.

7 Quasi tutte le certose promuovevano opere d’arte, erano fornite di ricche biblioteche, con preziose pergamene, manoscritti, incunaboli e molti libri di carattere letterario, scientifico e storico oltre che religioso.

8 Oggi la pratica è meno diffusa.

9 Con l’istituzione del Capitolo Generale di Grenoble da parte di Sant’ Anselmo nel 1140, prende vita quello che verrà riconosciuto come l’organo centrale che determina gli orientamenti di tutte le Certose, diventando così un elemento fortemente aggregante: il capitolo infatti prevedeva un incontro annuale o biennale di tutti i priori di tutte le certose a Grenoble.

10 Una sorta di ispettori che avevano competenza sulle varie province certosine. Venivano nominati tra i priori ogni due anni dal Capitolo Generale con precise funzioni ispettive a livello provinciale; la loro istituzione favorì gli scambi culturali tra certosa e certosa.

11 Da qui scaturisce il propositum cartusiense secondo l’espressione stessa di Guido di St. Roman, quinto priore di Chartreuse e redattore delle “consuetudines”: la custodia della cella da parte del suo abitatore, che la deve considerare necessaria alla propria salvezza, si mostra principio basilare della vocazione certosina.

12 Mario de Cunzio, in un bel volume pubblicato da Franco Maria Ricci in poche copie e ormai esaurito, affermava che costruire una certosa era come fondare una città di Dio, una Gerusalemme Celeste nella quale penetrare sempre più all’interno, superando mura e attraversando porte, per raggiungere livelli di beatitudine sempre più intensi. Come in una città bisognava regolare spazi e percorsi, dimensioni e superfici, volumi e altezze, secondo criteri estetici e funzionali, ma rispettando equilibri gerarchici e simbolici.

13 Come nella città ideale ci sono tempio, strade e piazze, così nella certosa devono esserci la chiesa, i porticati e i chiostri; edifici pubblici e privati corrispondono ai fabbricati cenobiti e alle celle.

14 Come ad esempio la Grande Chartreuse I, distrutta da una valanga.

15 Per lo più legno, come testimoniano le descrizioni di alcune parti di antiche certose.

16 Solo per citarne alcuni: Nel 1921 Il Volckers indicava i prototipi tipologici delle certose nelle laure orientali, in parallelo con coloro che nella particolare esperienza religiosa praticata dai certosini vedono una sintesi tra le forme del monachesimo occidentale e quello orientale. Nel 1947 lo studioso tedesco Muhlberg individua un particolare tipo di separazione all'interno della chiesa tra la zona dei monaci e quella dei fratelli conversi. Nel 1972 Marijan Zadnikar, a proposito delle certose slovene, scrive un capitolo introduttivo dedicato alla storia degli edifici dell'Ordine dove, pur notando una considerevole varietà di impianti, si tenta di stabilire gruppi tipologici determinati dalle reciproche posizioni del grande chiostro e del piccolo chiostro in rapporto alla chiesa. Nel 1979, nel volume dedicato alla Certosa di Firenze, il Leoncini compie un excursus per le strutture più antiche a testi del XII secolo; se ne deduce che, a differenza di quanto accadeva nell'ordine cistercense dove già con San Bernardo si assiste a una perfetta pianificazione edilizia e all'elaborazione di un impianto architettonico che in ogni parte d'Europa verrà realizzato con le uniche varianti costituite dai materiali di costruzione, nell'ordine certosino, per tutto il XII e il primo XIII secolo, gli edifici fondati sono piccoli e poveri e la loro costruzione è affidata a maestranze estranee all'Ordine e questo anche per il ridotto numero di monaci e conversi previsti per ogni fondazione.

17 Paris, 1983, pp. 25-28 e tav. V.

18 Tipo A: Vede il grande chiostro alle spalle della chiesa e il piccolo chiostro alla destra dell'edificio di culto.

19 Variante A1: Determinata dal variare della posizione del piccolo chiostro che in questo caso di colloca a sinistra della chiesa.

20 Tipo B: Vede la chiesa affiancata a sinistra del grande chiostro e a destra del piccolo.

21 Distrutta nel 1132.

22 Il tipo E non ha varianti speculari.

23 Si deve sempre rilevare che esso è fondato spesso su ristrutturazioni tarde delle varie certose e sull'ipotesi che esse abbiano seguito la disposizione originaria delle varie strutture.

24 Un insediamento di tipo cenobitico che sorgeva nella stessa diocesi di Vienne, in cui sarà poi fondata la Grande Chartreuse.

25 Le varianti si limitano quasi esclusivamente a giocare sulle possibili reciproche combinazioni dei tre elementi essenziali – chiesa, piccolo chiostro, grande chiostro – e dei fabbricati ad essi annessi.

26 Data da San Bruno di Colonia.

27 Fu il priore Generale dell'Ordine certosino, Innocent Le Masson, a commissionare dalla Grande Chartreuse di Grenoble tra la fine del XVII e l'inizio del XVIII secolo una serie di dipinti che dovevano rappresentare a volo d'uccello tutte le case dell'Ordine, la cosiddetta Galerie des cartes.

28 Dalla Francia all'Italia, dalla Germania all'Inghilterra, dalla Spagna alla Russia, ed organizzate in 17 province, quelle di Chartreuse, Provence, Bourgogne, Aquitane, France sur Loire, France sur Seine, Picardie, Teutonie, Angleterre, Saxe, Alemagne Inferieure, Alemagne Superieure, Lombardie, Toscana, Saint Bruno, Catalogne, Castille.

29 Ad esempio, Tino da Camaino e Francesco de Vito, architetti della Certosa di San Martino, furono invitati per trenta giorni a Trisulti, per volere del re, al fine di conoscere l'organizzazione generale del suo impianto.

30 Così veniva chiamato il priore della Grande Chartreuse.

31 Definiscono un complesso di edificazioni identificato come “casa alta” o “domus superior”.

32 Fanno parte della zona cenobitica ambienti come il refettorio, il capitolo delle colpe, uno dei padri e uno dei conversi, e la chiesa sempre divisa in due zone, quella riservata ai conversi e quella più interna, riservata ai padri.

33 I certosini svilupparono fin dal medioevo anche una simbologia parallela a quella della Gerusalemme Celeste, perché legata a una idealizzazione di altri luoghi biblici della Palestina; e tale simbologia esprime pienamente la particolare vocazione alla quale si conforma l'architettura del loro monastero.

34 Questo perché la Galilea, secondo l'antica etimologia, significa “passaggio”, perché in Galilea Cristo insegnò agli uomini a migrare con la mente, dalla terra e dalle cose terrestri al cielo e alle cose celesti; in Galilea Cristo con la resurrezione passò dalla morte alla vita.

35 Il chiostro, infatti, si apre di solito agli ambienti della vita comunitaria: chiesa, sala del Capitolo, refettorio, biblioteca, dispensa, cucina, cimitero.

36 La parte riservata ai padri e quella riservata ai conversi.

37 Vi si svolgono gli atti giuridici o più notevoli, riguardanti la vita e il governo della comunità religiosa: l'elezione del Priore, l'apertura e chiusura della Visita canonica, le votazioni per l'ammissione al noviziato, alla professione semplice e solenne.

38 La Regola certosina, legata alla spiritualità della Chiesa delle origini e a quella dei Padri del deserto, impone anche particolari abitudini alimentari, quali la totale assenza di carne e derivati, perché ritenuti troppo attinenti alla materialità. Frequente è invece l'utilizzo del pesce, per i suoi significati cristologici e dei frutti di mare, ostriche in particolare per le valenze simboliche che rappresentano. Di conseguenza, mai, neppure in caso di malattia, eccetto la degenza in ospedale, il certosino si nutre di carne. Al mattino non prende nulla e, per due terzi dell'anno, alla sera si accontenta di una cena frugale a base di pane e una bevanda. Durante l'Avvento e la Quaresima al certosino sono vietati, inoltre, il latte, il formaggio e il burro. Un giorno alla settimana, generalmente il venerdì, se la salute lo consente, il certosino fa astinenza a pane e acqua. Il pasto principale, comunque, quello consumato verso le undici della mattina è sano ed abbondante.

39 Le casette o celle possono raggiungere un numero che va da un minimo di dodici ad un massimo di trenta.

40 Il mestiere della falegnameria è così importante nella vita quotidiana dei certosini

perché rimanda alla figura di San Giuseppe, connessa alla Madonna, patrona di tutto l’Ordine nonché legato ad un estremo sforzo di Imitatio Christi

41 La presenza dei giardini monastici è legata al fatto che erano in prevalenza giardini utili al miglioramento dell’esistenza dei religiosi, fonte di nutrizione e di salute.

42 Il giardino degli aromi reca significati che sovrastano la sfera del tangibile, proiettandosi nella universalità. Il cinnamomo, simbolo dell’ascensione di Cristo in cielo e del battesimo, significa innocenza, purezza, penitenza. La melagrana, sotto la cui scorza si nasconde un gran numero di semi è il simbolo della Chiesa, che riunisce in una sola fede uomini e genti diversi. Questo frutto carnoso appartiene a una antichissima tradizione della fertilità, fecondità e maternità, emblema della forza creatrice della grande Madre, elemento sacro, santo, positivo, della natura femminile. In questa prospettiva, Maria diviene il frutto della melagrana e Cristo, suo figlio, il redentore, l’albero dai frutti rossi.

43 Se nella Betlemme storica Maria diede al mondo Gesù, nella Betlemme spirituale il solitario riceve continuamente da Maria la grazia crescere in Cristo.

44 Negli Statuti del 1510, che riportano quanto disposto da Guido tra il 1121 e il 1127, si afferma che il certosino «deve considerare la cella necessaria per la sua salvezza e per la sua vita così come l’acqua per i pesci e l’ovile per le pecore. Quanto più ci vivrà tanto più l’abiterà volentieri, se si abiterà ad uscirne fuori frequentemente, e per cause di poca importanza, preso la considererà odiosa».

45 In ogni certosa i fabbricati della Casa Bassa - le cosiddette “obbedienze” -, per quanto sviluppati, rimangono sempre subordinati, soprattutto dal punto di vista concettuale, al suo nucleo fondamentale formato dalla chiesa e dai due chiostri tradizionali.

46 Sono generalmente addetti ai servizi domestici e anche a funzioni amministrative. Sono amministratori, dirigenti agricoli, capomastri, artigiani e costituiscono il punto di congiunzione tra la comunità certosina e il territorio circostante su cui spesso i certosini esercitavano i diritti feudali.

47 Il desertum o hortus è un giardino chiuso, protetto da Dio. In questo giardino crescono i gigli della castità, l’isopo della umiltà, le rose della pazienza, gli abeti della contemplazione; la mira dell’astinenza vi spande il suo profumo, e così pure l’incenso della preghiera e gli altri profumi delle Virtù indicate nelle sacre scritture coi diversi nomi di alberi e piante aromatiche.

48 Il diploma di fondazione è datato 28 gennaio 1306, contestualmente alla donazione all’ordine certosino.

49 Nel caso di San Martino fu Carlo l’Illustre Duca di Calabria; in quello di Guglionesi fu Agnese di Durazzo moglie di Giovanni di Sicilia.

50 Fondatore della certosa di San Giacomo fu Jacopo Arcucci Maestro Razionale della Gran Curia sotto Roberto d’Angiò, e in seguito tesoriere della Regina Giovanna, mentre la certosa di Chiaromonte fu fondata da Venceslao Sanseverino Duca di Venosa.

51 La certosa dava forti garanzie al progetto laddove la ricanalizzazione delle terre invase dalle paludi era nel medioevo un servizio reso dalle grandi organizzazioni monastiche, dai benedettini in particolare, ma anche dall’ordine dei certosini che, con l’organizzazione

feudale, incidere profondamente sul territorio potendo servire allo scopo.

52 Non si conoscono i nomi degli architetti preposti alla costruzione del cenobio. Si sa che furono i monaci di Trisulti ad impostarne il progetto, costituendo il primo nucleo della comunità padulese.

53 Monte è un argentiere molto noto a Napoli ed è anche al servizio dei certosini di San Martino.

54 La paternità dei lavori è stata attribuita in base ad una lettura stilistica, come sostengono studiosi quali Schiavo, De Cunzio e de Martini. A rendere plausibile l’opera di Sanfelice è la sua adesione al Sublime che, nella visione settecentesca italiana, tende ad esaltare da un lato il pathos e dall’alto l’elevazione spirituale.

55 Il volto settecentesco caratterizzante la Certosa di San Lorenzo, mentre da un lato conferisce alla stessa una particolare suggestione, dall’altro la differenza fondamentalmente da quella di San Martino che risente di una più forte connotazione retorica, sia per la ricchezza degli ornati, sia per l’apparato figurativo, sia per la scelta degli arredi.

56 All’indomani delle prime soppressioni degli Ordini religiosi e dei loro monasteri.

57 Documenti parlano di 172 quadri grandi dispersi tra le tantissime chiese del Regno delle Due Sicilie.

58 Il 27 marzo 1847, nel tentativo di perorare la richiesta dei certosini di Padula, il Ministro Segretario dello Stato degli Affari Interni scrive al direttore del Real Museo Borbonico chiedendo che i monaci “...si sarebbero accontentati anche di un congruo numero di quadri sacri, non necessariamente quelli sottratti alla loro Certosa.”. Il 17 aprile un funzionario del Museo Borbonico comunica però al suo direttore che “...avendo letto i notamenti de’ quadri di scarto che tuttavia si conservano in uno de’ magazzini del lato orientale del N.S. museo, non ho trovata alcuna indicazione di soggetti sacri i quali saranno esauriti dalle scelte fatte dalle diverse congregazioni religiose”. Il Ministro Segretario di Stato, qualche mese più tardi, scrive al Priore della Certosa “nell’ordinario Consiglio di Stato ho fatto presente al re..., e ho pure inviato alla M.S. una domanda posteriormente fatta dal Priore della Certosa... di avere quadri sacri e conseguire così lo scopo di decorare la chiesa e le cappelle della chiesa medesima. E S.M. considerando che non convenga ai certosini fare commercio di quadri profani...non ha trovato luogo alla domanda”. Ai certosini, viste le risposte ricevute, non restò altro da fare che commissionare al pittore napoletano Salvatore Brancaccio tre dipinti che servirono ad ornare la zona presbiteriale. I dipinti si trovano tuttora nella chiesa della certosa e sono datati 1857.

59 Del resto, nel corso dei secoli, proprio per la sua peculiarità, la certosa di San Lorenzo era stata meta di visite illustre. Thomas Salmon, noto viaggiatore inglese del XVIII secolo, visitò la Certosa di San Lorenzo. Ne la “Storia del Regno di Napoli” pubblicato nel 1763 nella tipografia di Vincenzo Mazzola – Vocola, tratta del Regno di Napoli e documento fondamentale sia per la storia della Certosa di Padula che per la comprensione dell’importanza ad essa attribuita, nel XVIII secolo, nell’intero territorio del Regno di Napoli, Salmon, fornisce descrizioni precise circa il ciborio sito, all’epoca della sua visita, sull’altare della sagrestia della chiesa certosina. L’autore descrive i dipinti di Luca Giordano e Giuseppe Farelli che ornavano il Capitolo e la Chiesa, questi ultimi,

secondo Giovan Battista Pacichelli raffiguravano episodi della vita di San Lorenzo, mentre sull'altare della Sala del Tesoro troneggiava un dipinto di Paolo de Matteis. Nel 1778 Jean-Claude Richard de Saint-Non, abate di Saint-Non o, Abbè de Saint-Non, incisore disegnatore umanista ed archeologo, mecenate e viaggiatore francese visitando la Certosa riferì che nella sala del Capitolo dei Padri c'era uno dei più bei dipinti del Giordano che rappresenta il Sonno del Bambino. Nel 1883 Francois Lenormant, assiriologo e professore di archeologia alla biblioteca nazionale di Parigi, visitò con molta attenzione la certosa di Padula nel corso di un suo viaggio nell'Italia del sud, dormendo in una delle fatiscenti celle abbandonate dai padri certosini. L'anno precedente la visita di Lenormant la Certosa venne dichiarata monumento nazionale.

60 Tra queste si ricorda la cella numero 5 ove è stato ripristinato l'Orto dei Semplici. Spazio fondamentale della vita dei Padri Certosini, in cui i monaci coltivavano le erbe officinali. I primi Orti dei Semplici furono installati dai Benedettini, ma ben presto divennero un aspetto importante anche per gli altri Ordini, come quello dei Certosini e dei Cistercensi che li istituirono a perfezione all'interno dei loro monasteri. La coltivazione, la raccolta e l'essiccazione delle erbe medicamentose era affidato ad un frate esperto di giardinaggio, farmacia, medicina e spezie.

61 In alcuni casi con un unico contratto.

62 Bancale: fedi di deposito, fedi di credito.

CAPITOLO OTTAVO

**Il progetto di documentazione della cittadella monastica
di San Lorenzo, a Padula.
Procedure di rilievo integrato e manipolazione del modello digitale**

La documentazione di siti e monumenti architettonici richiede l’analisi di informazioni provenienti da fonti diversificate. Il dato metrico e geometrico definisce la base, imprescindibile, per le più disparate necessità connesse oggi con il patrimonio costruito: la documentazione, la gestione delle informazioni, l’archiviazione, l’analisi, il monitoraggio e la disseminazione. Al contempo, l’esperienza ha dimostrato che è possibile fornire le informazioni necessarie, nel rispetto di una congrua accuratezza e completezza, solo attraverso l’integrazione di dati multi-sorgente. L’uso parallelo di misure geodetiche, rilevamenti topografici, acquisizioni fotogrammetriche e scansioni laser risulta l’approccio più soddisfacente. In particolare, l’integrazione tra dati provenienti da scansioni laser tridimensionali e da fotogrammetria digitale, garantisce il controllo e l’affidabilità della misura oltre all’arricchimento del dato colorimetrico. Una grande quantità di ricerche, difatti, è stata condotta negli ultimi vent’anni in tale direzione, provando che le suddette due tecnologie possono completarsi a vicenda per la generazione di modelli tridimensionali digitali di alta qualità. Generalmente, i sensori range-based forniscono una raccolta di dati, discretizzati in nuvole di punti dense, efficacemente idonea per la produzione di modelli geometrici ad elevato livello di dettaglio; dall’altro lato, la fotogrammetria digitale si connota come la tecnica più adatta al processamento di modelli tridimensionali con texture ad alta risoluzione, rappresentativi della morfologia generale di un manufatto. La fusione di entrambe le tecniche di rilievo spazia dall’applicazione dei fotogrammi digitali sui modelli tridimensionali, ottenuti dal laser scanner,

alla manipolazione delle immagini per estrarre informazioni, su spigoli e caratteristiche di superfici lineari, al fine di colmare le lacune esistenti nei dati dello scanner e aggiungere nuovi dettagli per migliorare la percezione realistica dell’architettura.

In aggiunta, le possibilità offerte dalla fotogrammetria digitale e lo sviluppo incessante di camere digitali compatte ad altissima risoluzione, associate ad una sempre maggiore miniaturizzazione e sostenibilità in termini di costi della sensoristica, ha permesso, in questi ultimi dieci anni, un sostanziale incremento di sistemi aerei a pilotaggio remoto impiegati per la realizzazione di rilievi fotogrammetrici in campo archeologico, architettonico, urbano e ambientale.

La tecnica aerea è una soluzione ottimale nel caso di siti di medie e grandi dimensioni poiché la possibilità di sollevare sensori e portarli in quota, consente di catturare informazioni che spesso sono difficili da registrare a livello del suolo. La diffusione, poi, di numerosi sistemi in grado di acquisire immagini digitali ad alta risoluzione a basso costo, ha superato il limite dei tradizionali rilievi fotogrammetrici. Palloni aerostatici, mongolfiere, aerei ed elicotteri ultraleggeri, mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo, consentono la registrazione di fotogrammi a bassa quota, con vantaggi sotto il profilo economico e di pianificazione dell’altitudine e traiettoria di volo.

Le diverse esperienze eseguite a livello nazionale ed internazionale riportano la formulazione di approcci diversi in relazione all’impiego di piattaforme differenti: dai sistemi non motorizzati quali palloni, aquiloni ecc., a quelli che prevedono l’utilizzo di motori elettrici o a combustione come gli aeromodelli ad ala fissa e i mini-elicotteri.

Oggi, a seguito delle esperienze e dei test eseguiti su varie piattaforme, si è ormai orientati all’adozione di mini-elicotteri non a singola elica ma supportati da sistemi a quattro, sei e otto eliche (i cosiddetti quadri, esa o epta-cotteri), poiché garanti di maggiori vantaggi. I multicotteri sono, infatti, in grado di coniugare una migliore maneggevolezza e stabilità in fase di volo, rispetto ai tradizionali mini-elicotteri con una sola elica. I loro costi sono sensibilmente contenuti e ridotti, alla luce della sempre maggiore richiesta di tali piattaforme; inoltre, la loro sensoristica, la struttura del telaio e il principio di funzionamento garantiscono una semplificazione nelle operazioni di controllo da parte dell’operatore addetto alla fase di volo e all’acquisizione degli scatti fotografici.

Data questa premessa, la metodologia, delineata nella presente ricerca, per l’acquisizione dei dati spaziali dell’architettura del caso studio, prescrive l’applicazione integrata dei sensori tridimensionali, oggi più comunemente

impiegati nel rilievo architettonico. Per lo studio proposto, la scelta ritenuta più idonea seleziona - tra i sensori passivi - la tecnica della fotogrammetria, sia terrestre che aerea, da integrarsi all’acquisizione attiva con laser scanner

8.1 Il rilievo tridimensionale della certosa di Padula

Al fine di realizzare una rete di rilevamento tridimensionale in grado di ricomprendere e controllare l’intera area del cenobio padulese, è stata predisposta una metodologia che integra alcune tecniche di rilievo selezionate tra quelle reality-based: (i) indagine fotogrammetrica aerea per l’acquisizione di una nuvola di punti generale del sito di interesse; (ii) rilievo laser scanner di ambienti interni e facciate esterne selezionate, per il processamento di una nuvola di punti dettagliata, precisa e accurata; (iii) battuta fotogrammetrica terrestre per riempire eventuali vuoti e migliorare il dato colorimetrico; (iv) indagine topografica classica con stazione totale per acquisire *Ground Control Point* - GCP per scopi di ridimensionamento e integrazione dei dati; (v) rilevamento GNSS per la georeferenziazione delle informazioni spaziali.

8.1.1 Il rilievo fotogrammetrico aereo: valutazione dei parametri e acquisizione dei dati

La definizione di un modello digitale tridimensionale, rappresentativo della complessità architettonica della Certosa di San Lorenzo, è stata avviata da una prima raccolta di dati spaziali acquisiti attraverso fotogrammi scattati da un Sistema Aereo a Pilotaggio Remoto - SAPR.

Il modello impiegato è un multicottero a 4 eliche, di tipo commerciale - Phantom 3 Advanced (tabella 8.1) - con un peso di 1280g, equipaggiato con una fotocamera integrata da 12.4 Mpx e una autonomia di volo di circa 15/18 minuti.

Il rilievo fotogrammetrico è stato attentamente pianificato in relazione all’altezza di alcuni elementi come lo scalone ottagonale, la facciata d’onore, il campanile e la cupola della sala del Tesoro, allo scopo di evitare possibili deformazioni nel modello tridimensionale finale. L’estensione planimetrica del sito ha determinato, contestualmente, la scelta di effettuare più battute fotografiche per rispondere al requisito di accuratezza e all’obiettivo di garantire un elevato livello di automazione nella successiva fase di elaborazione dei dati.

Per acquisire le informazioni relative all’articolazione morfologica e

	DJI Phantom3 Advanced
Weight	0.30 kg
True focal lenght	3.57 mm
Sensor width	6.17 mm
Sensor height	4.55 mm
Sensor horizontal resolution	4000 pix
Sensor vertical resolution	3000 pix

Tab. 8.1. Principali caratteristiche tecniche del SAPR Phantom 3 Advanced.

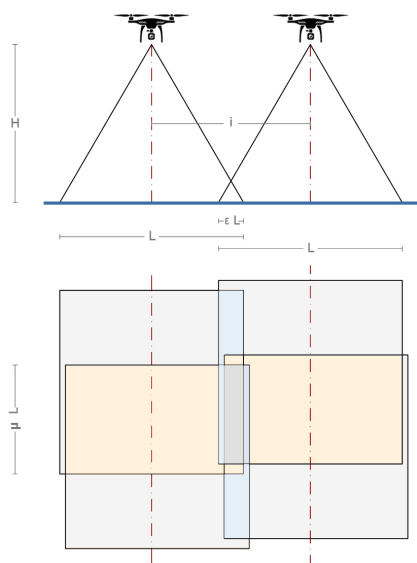


Fig. 8.1.1. Schema di ripresa con SAPR Phantom 3 Advanced. Sovrapposizione laterale.

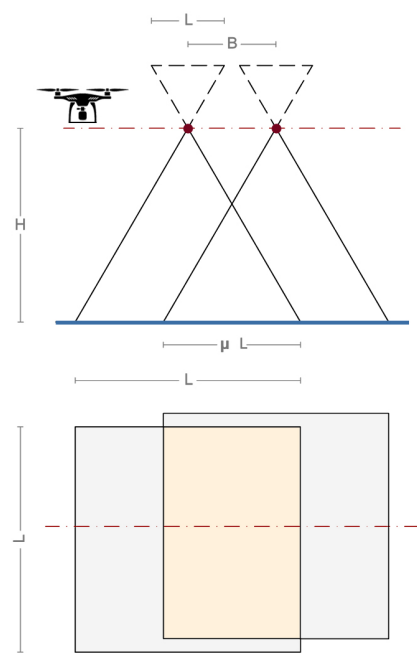


Fig. 8.1.2. Schema di ripresa con SAPR Phantom 3 Advanced. Sovrapposizione longitudinale.

territoriale dell'intero monastero, sono stati pianificati 6 voli complessivi in ragione della durata delle batterie del quadricottero.

La stima dei parametri di sovrapposizione dei fotogrammi - *overlap* e *sidelap* -, il calcolo dell'altezza di volo, la specificazione dell'inclinazione della fotocamera per la registrazione di riprese nadirali o oblique, sono state di volta in volta determinate in funzione dell'architettura da rilevare e del suo contesto urbano/paesaggistico.

Con il primo volo è stato pianificata una rete fotogrammetrica specifica orientata al ricoprimento dell'intero complesso monastico incluse le annesse pertinenze agricole del desertum. L'area da rilevare è stata preventivamente individuata su una immagine satellitare messa a disposizione da Google. Presentando contorni irregolari, la zona è stata racchiusa in un rettangolo ideale le cui dimensioni - $d_1 = 490$ m e $d_2 = 338$ m - corrispondono a quelle dell'estensione massima dell'area da registrare. A partire dal poligono di ingombro individuato, sono state estratte le coordinate dei punti costituenti i vertici della forma e da queste è stato determinato il numero delle strisciate con relativa localizzazione di *waypoints*. In ragione del contesto ambientale in cui è inserito il cenobio di Padula, costellato da fitta vegetazione e alberi di consistente elevazione, la quota di sorvolo del multirottore è stata obbligata per il primo volo a 60 m di altezza, con un conseguente abbracciamento dei fotogrammi di 104 x 78 m, secondo la (8.12 e 8.13).

L'area coperta da ogni singola immagine è stata valutata, difatti, calcolando l'angolo di campo α , conoscendo la lunghezza focale della camera.

Il SAPR utilizzato monta una fotocamera con una lunghezza focale equivalente riferita al formato 135 pari a 20 mm¹ per cui l'angolo di ripresa della diagonale del fotogramma, α , corrispondente è pari a 104.98 gon (94.48 deg), definito con la formula

$$\alpha = 2 * \text{atan}(d2/f) \quad (8.10)$$

in cui:

$d2$, è la metà della diagonale dell'area della pellicola o del sensore [utilizzando lo standard 135, ovvero 24x36 mm, $d2 = 21.63$ mm];
 f , è la distanza focale [3.57 mm per il Phantom 3 Advanced].

In virtù dell'altezza di volo obbligata e dell'angolo di campo, la misura della diagonale a terra per un'altitudine di 60 m, risulta pari a 130 m, per la formula

$$\text{diagonale} = H * \tan(\alpha/2) * 2 \quad (8.11)$$

in cui:

H, altezza media dal suolo mantenuta dal velivolo durante le strisciate.

Considerando che il rapporto del sensore del quadricottero è 4/3, essendo la sua risoluzione in pixel corrispondente a 4000 x 3000, sono state ricavate le dimensioni dell'area di ripresa a terra da una quota di 60 m ossia l'abbracciamento longitudinale e trasversale di ogni fotogramma, secondo le relazioni

$$\text{lato maggiore} = 4 * \text{diagonale} / 5 \quad (8.12)$$

$$\text{lato minore} = 3 * \text{diagonale} / 5 \quad (8.13)$$

In accordo alla teoria di acquisizione di informazioni fotogrammetriche tradizionale, il ricoprimento longitudinale è stato fissato al 70% garantendo una base di presa di circa 23 m, mentre il ricoprimento trasversale è stato fissato al 65% per assorbire eventuali errori di inseguimento delle rotte fissate, in relazione alla potenziale instabilità del velivolo per la quota di volo. La percentuale di sidelap ha permesso di fissare l'interasse tra due traiettorie adiacenti pari a 35 m, determinando un numero di 15 strisciate totali all'interno del rettangolo di ingombro individuato. La stima della geometria del volo è stata perfezionata, adattando la perimetrazione inclusiva iniziale ai contorni, più irregolari, della proprietà del monastero, ottimizzando in tal modo i tempi a disposizione per la campagna di rilievo. 30 waypoints sono stati estratti e fissati per la prima traiettoria di volo, articolata secondo un percorso di 4.5 km, della durata di 23 minuti. Lungo la direzione definita dal blocco di strisciate, è stata stabilita una velocità di sorvolo del drone, proporzionata alla altezza di 60 m, di 4.5 m/sec, con una stima più conservativa della velocità, in genere fissata da una regola empirica a 1m/sec per ogni 10 m di quota. Definita la velocità, è stata calcolata la temporizzazione degli scatti capace di garantire una sovrapposizione del 70% tra i fotogrammi consecutivi della stessa strisciata. Dovendo assicurare un avanzamento del 30% della lunghezza dell'immagine, corrispondente a 23.4 m, viaggiando a 4.5 m/sec, il multicottero impiega 5.2 secondi a percorrere tale distanza per cui è stato impostato un intervallo di scatto tra 2 foto di 5 secondi.

276 fotogrammi sono stati acquisiti dalla camera in posizione nadirale, con un *Ground Sample Distance* - GSD di 2.5 cm/px.

Per la pianificazione dei voli successivi, l'area è stata divisa in due parti - corrispondenti rispettivamente alla casa bassa e al nucleo più fitto della casa alta (da cui dunque è escluso il quartiere dei Padri) - e per ciascuna



Fig. 8.1.3. Traiettorie di ripresa con SAPR Phantom 3 Advanced.

zona sono state progettate acquisizioni fotogrammetriche specifiche.

Il secondo volo ha ricoperto i fabbricati della casa bassa con gli attigui campi con un'altezza di volo analoga alla precedente. La stima delle percentuali di ricoprimento longitudinale e trasversale e della velocità di sorvolo ha rispettato le formulazioni già indicate per il primo volo. Il SAPR ha volato in modalità autonoma, seguendo una traiettoria di navigazione scandita da 14 waypoints georeferenziati. 120 immagini nadirali sono state registrate con una distanza di campionamento dal terreno media di 2.5 cm/px. Alcune immagini oblique, con un angolo medio rispetto all'orizzontale di circa 45°, sono state acquisite per migliorare l'elaborazione dei dati, favorendo la cattura di informazioni parziale anche sugli alzati.

Il terzo decollo, eseguito - al pari di tutti gli altri voli - in corrispondenza del waypoint localizzato in ogni geometria di navigazione nell'angolo N-O più a settentrione, ha avviato una registrazione dei dati compiuta sull'area comprensiva di tutti gli elementi edificati del monastero di San Lorenzo, escludendo dalla traiettoria le pertinenze del desertum (Figura 8.1.3). La cattura delle informazioni fotogrammetriche è stata pianificata prevedendo una quota più bassa rispetto ai voli precedenti, in virtù dell'assenza di elementi fortemente elevati come gli alberi. Il velivolo, attestato ad un'altezza di 50 m, ha percorso in modo autonomo un blocco articolato in 15 strisciate, con interasse di 30 m. Con una base di presa di circa 20 m, sono stati catturati 180 fotogrammi alla velocità di 4 m/sec e *timelaps* di 4 secondi, per un GSD di 2 cm/px.

Allo scopo di acquisire informazioni più di dettaglio relative alle costruzioni significative del cenobio, localizzate tra la *domus inferior* e il primo nucleo dell'area eremitica, sono stati progettati altri due voli (Figura 8.1.4). Il piano di registrazione delle fotografie è stato impostato secondo una doppia griglia, ad assi ortogonali e quota di sorvolo di 40 m. Lungo i due blocchi di strisciate, scanditi da interassi di circa 25 m, il sensore della camera è stato posizionato con un angolo obliquo compreso tra i 30° e i 40°. Un GSD di 1.7 cm/px è stato assicurato per la cattura di 600 fotogrammi, con una velocità di 3.3 m/sec.

Un ultimo volo è stato effettuato per la raccolta di dati sui prospetti del chiostro grande. Il SAPR in questo caso ha volato in modo assistito affinché il pilota fosse in grado di regolare la posizione e l'orientamento dell'aeromobile in relazione alle condizioni ambientali. Il chiostro della certosa presenta due grossi alberi posizionati in prossimità del fronte

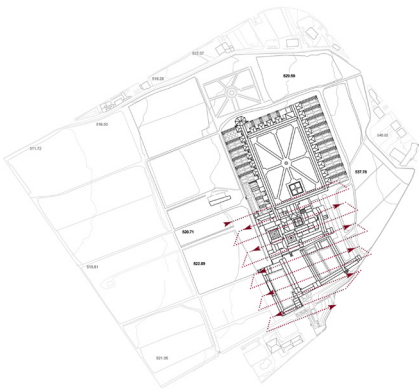


Fig. 8.1.4. Traiettorie di ripresa con SAPR Phantom 3 Advanced.

sud, nel perimetro del cimitero dei Padri; inoltre, essendo frequentato da turisti, si è ritenuto più idoneo lasciare al pilota la possibilità di modulare i parametri del volo durante la navigazione. Altro dato importante, che ha influito sulla decisione della modalità di volo, è l'illuminazione delle facciate che, evidentemente, in riferimento all'orario, comporta la presenza di ombre portate su alcuni prospetti mentre altri sono direttamente colpiti dalla luce solare, manifestando una illuminazione diffusa e uniforme. Le riprese sono state effettuate impostando un intervallo di 2.5 secondi, permettendo all'operatore di visualizzare brevemente il fotogramma prima di acquisire ogni foto e, eventualmente, riposizionare il quadricottero se necessario. Sono state acquisite sia immagini verticali - con piano di presa quanto più parallelo possibile al piano dominante del fronte rilevato - che oblique - con un angolo medio dalla verticale di circa 30° -. Ad una altitudine di 40 m, osservando una distanza dall'oggetto di circa 8 m, è stato garantito un GSD medio inferiore a 4 mm per 160 fotogrammi.

8.1.2 Rilievo laser-scanning terrestre. Raccolta dei dati

Per una conoscenza e documentazione più esaustiva della tipologia certosina, si è deciso di dettagliare l'acquisizione delle informazioni spaziali per alcuni ambienti interni e facciate esterne, selezionate tra le componenti architettoniche più significative del monastero padulese. L'obiettivo è quello di ottenere un prodotto tridimensionale coerente con la finalità di documentazione, analisi e rappresentazione dell'architettura di San Lorenzo.

L'organizzazione, la morfologia, la geometria, la dimensione e le caratteristiche cromatiche delle diverse parti che, aggregandosi, strutturano l'organismo architettonico della certosa ha suggerito la scelta di utilizzare e integrare due diverse tecniche di rilievo reality-based per la generazione di un modello digitale finale accurato, dettagliato e fotorealistico.

In particolar modo, si è deciso di approfondire il progetto di documentazione, attraverso scansioni progressive a quota terrestre, per alcuni degli ambienti più significativi della *domus superior*, quali:

- chiesa monastica;
- chiostro della foresteria nobile;
- chiostro dei Procuratori;
- scalone monumentale;
- cella tipo di un Padre (n.7).

Faro Focus 3D Cam2	
Type	Phase shift
Wavelength	905 nm
Beam divergence	0.16 mrad
Ranging error	±5 mm @10 m and @25 m
Ranging noise	0.6 mm @10 m; 0.95 @25 m

Tab. 8.2. Principali caratteristiche tecniche del laser scanner Faro Focus 3D Cam2.

La diversa articolazione spaziale, la complessità della manipolazione geometrica delle masse, la ricchezza delle decorazioni delle strutture, ha richiesto, per un prima campagna di rilevamento, la scelta di una tecnologia in grado di acquisire informazioni accurate e precise, su distanze variabili, restituendo una visione di insieme dello spazio, ma anche i suoi dettagli più minuti. Sulla base di queste considerazioni, è stato impiegato un sensore attivo range-based ovvero uno scanner laser a modulazione di fase (par. 4.1.1) Faro Focus 3D Cam2 (tabella 8.2).

L'emissione di un laser ad infrarosso e la sua riflessione di ritorno al dispositivo definisce il sistema adottato per la misurazione di distanza dei punti di una superficie. La misura, calcolata con una precisione millimetrica, è dedotta confrontando la fase dell'onda emessa con quella ricevuta dopo la riflessione sulla superficie dell'oggetto. Lo sfasamento del segnale modulato tra il raggio dell'onda sinusoidale inviato e quello riflesso di rimando, inteso come la differenza tra i due picchi della sinusoide, costituisce la “differenza di fase” ed è ottenuta dalla relazione

$$\Delta\lambda = (\Delta\varphi/2\pi)*\lambda \tag{8.14}$$

in cui:

$\Delta\varphi$, è il tempo di volo;

λ , è la lunghezza d'onda del segnale modulato.

Il sensore attivo, impiegato per la prima campagna di acquisizione, ha un campo visivo di 360° sull'asse orizzontale e di 305° su quello verticale, corrispondente orientativamente allo spazio di occlusione del treppiede su cui lo strumento viene montato. Durante la rotazione dello strumento intono all'asse verticale, uno specchio rotante dirige il raggio laser in direzione verticale sull'oggetto, codificando contemporaneamente l'angolo e la misurazione della distanza. La strumentazione acquisisce informazioni di distanza in un range che varia dai 0.6 ai 120 metri, oltre che i valori di riflettanza dei punti acquisiti, con un'accuratezza di ±2 mm a 25 metri ed una risoluzione angolare di 0.009°.

Le dimensioni e il peso molto contenuti (5 kg) rendono tale tipo di strumentazione particolarmente efficace per la restituzione di informazioni dimensionali accurate in ambienti con articolazioni spaziali non troppo complesse ma estese, per lavori con tempistiche più o meno contenute, oltre alla possibilità di acquisire milioni di punti anche lavorando in condizioni di illuminazione scarse o disomogenee.

Lo strumento è in grado di registrare quasi un milione di punti di misurazione al secondo (fino a 976000 punti/sec). Per ciascun punto è

generata una coordinata polare (δ, α, β), definita dalla distanza, l'angolo verticale e quello orizzontale e convertita poi in una coordinata cartesiana (x, y, z). Congiuntamente, è registrato il valore di riflettanza che esprime la capacità di un oggetto di riflettere il raggio laser e pertanto è variabile a seconda della natura del materiale di cui è composta la superficie dello stesso. La riflettanza è espressa da un numero codificato, all'interno di un determinato range. Al valore più basso corrisponde una riflettanza nulla (ovvero il corpo assorbe completamente il raggio senza rifletterlo), mentre a quello più alto è associata la riflettanza massima.

Il laser scanner impiegato è dotato di camera digitale integrata, coassiale rispetto al raggio luminoso, che consente la restituzione dell'informazione radiometrica dei punti grazie all'acquisizione di fotografie, registrate contestualmente alla scansione laser.

Gli ambienti della certosa presentati sono stati rilevati attraverso l'acquisizione di 100 scansioni totali progressive così organizzate: 13 per l'aula unica della chiesa monastica e annessa sacrestia; 8 per il chiostro della foresteria nobile; 6 per il chiostro dei Procuratori; 24 per la cella tipo dei Padri, articolata su due livelli con annesso orto e laboratori seminterrati; 39 per lo scalone monumentale, rilevato nella sua articolazione interna e prospetti esterni; 10 lungo il braccio porticato del chiostro grande, coincidente con l'asse prospettico della certosa, per il concatenamento delle scansioni relative ai precedenti 3 nuclei compositivi.

Il numero e posizionamento delle stazioni successive è stato stabilito in funzione della geometria dell'architettura, con lo scopo di riprodurre

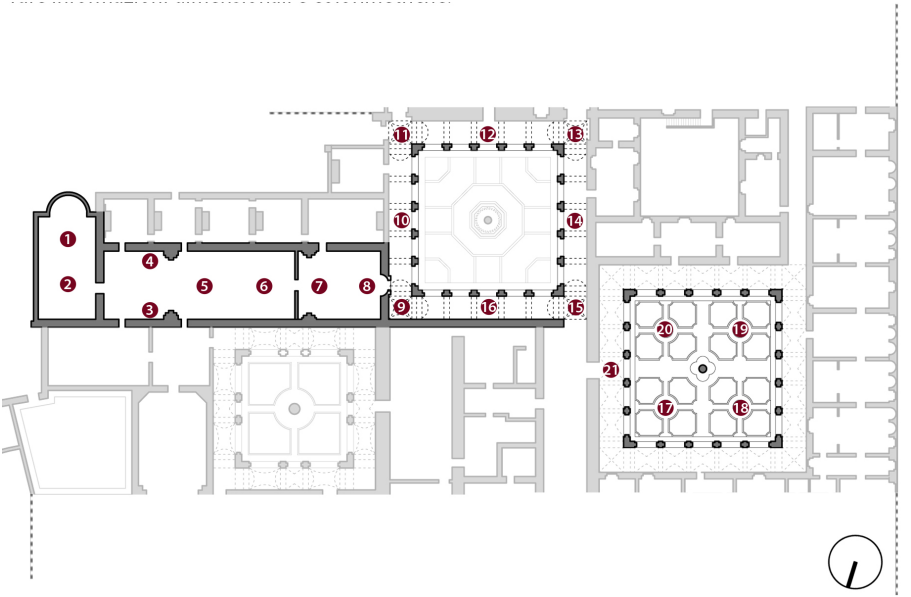


Fig. 8.1.5. Esemplificazione dei punti di stazione del laser scanner per gli ambienti della chiesa monastica, chiostro della foresteria nobile e chiostro dei Procuratori.

l'intera forma dell'ambiente catturato, con meno buchi e zone di ombra possibili, evitando la tangenza delle superfici. Targets piani e sferici sono stati posizionati in diversi punti dell'area da rilevare e inquadrati durante le riprese, al fine di semplificare la successiva fase di allineamento tra le singole scansioni. La posizione di questi riferimenti è stata pianificata in modo da garantire la loro visibilità da diverse postazioni ed in punti particolarmente critici per l'allineamento delle range maps.

I parametri di acquisizione in termini di risoluzione - numero di punti da acquisire per la discretizzazione dell'oggetto - e accuratezza - numero di misurazioni successive dello stesso punto per il calcolo del valore medio - sono state impostate in ragione della complessità geometrica del manufatto e della finalità del rilievo. Impostata una distanza massima tra le range maps raccolte di 20 metri, il parametro di risoluzione media è stato fissato a 6 mm per una distanza di 10 metri, determinando una nuvola grezza per ciascuna scansione di massimo 44.4 Milioni di punti, con una risoluzione di 10240 x 4338 pts.

Ogni punto di discretizzazione della geometria catturata, è stato battuto 4 volte, per una durata complessiva di ciascuna acquisizione di orientativamente 8 minuti.

8.1.3 Acquisizione fotogrammetrica terrestre

La necessità di associare all'accuratezza del dato metrico una rappresentazione colorimetrica in grado di esprimere le qualità materiche e visive di una architettura, ha motivato l'integrazione tra le diverse tecniche di rilievo reality-based, rendendola una pratica sempre più diffusa nel settore dei Beni Culturali.

Il dato tridimensionale registrato con tecnica range-based, restitutivo di una rappresentazione complessiva delle strutture principali del cenobio di Padula, è stato integrato con informazioni acquisite tramite sensori 3D passivi. I modelli digitali image-based, basati su algoritmi fotogrammetrici (par. 4.2.1), hanno così permesso di ottenere un miglioramento delle informazioni colorimetriche per la texturizzazione del modello finale e di integrare dati mancanti nella maquette precedente.

In aggiunta, una campagna di fotogrammetria terrestre è stata condotta per il rilievo di altri elementi architettonici espressivi della singolarità del monastero di San Lorenzo:

- facciata d'onore;
- cortile d'onore;

- chiostro del cimitero antico;
- chiostro del refettorio;
- facciata esterna principale (prospetto meridionale),

per la cui articolazione morfologica e geometrica, la metodologia image-based è stata valutata soddisfacente.

Fissato un Ground Sample Distance medio di 3.5 mm, una fotocamera Reflex Canon EOS 1300D (tabella 8.3) è stata impiegata per l'acquisizione dei diversi *datasets*, articolati in: 117 fotogrammi per la facciata d'onore, 200 scatti per il cortile d'onore (strutturati in 3 sotto datasets, il primo per l'ospizio dei pellegrini, il secondo per la casa dei conversi e il terzo per il retro del prospetto meridionale); 404 immagini per l'androne di accesso alla corte esterna con la volta a botte lunettata; 18 fotogrammi per il chiostro del cimitero antico; 24 scatti per il chiostro del refettorio; 361 fotografie per la facciata esterna meridionale; 527 immagini per la navata della chiesa monastica (raggruppate in 3 sotto datasets, il primo per il coro dei conversi, il secondo per il coro dei Padri e l'ultimo per l'altare); 34 fotogrammi per il chiostro della foresteria; 66 fotogrammi per il chiostro dei Procuratori.

La tecnica di ripresa adottata prevalentemente è stata quella ad assi paralleli, ideale per complessi architettonici che si estendono notevolmente in lunghezza. In modo da ottenere il riconoscimento di un adeguato numero di punti omologhi, è stata garantita una sovrapposizione media tra le immagini acquisite di circa il 70%. La ripresa ad assi paralleli è stata associata ad una acquisizione ad assi convergenti pertanto mediamente ogni 10 fotogrammi, sono state scattate immagini con l'asse di mira della camera inclinato approssimativamente di 45° rispetto alla verticale del piano dominante (par. 4. 2.2). Questa procedura ha permesso di recuperare informazioni spaziali su diversi livelli di profondità e di limitare gli errori di distorsione. In ragione dei rapporti di scala tra lo spazio al suolo e l'elevazione degli elementi inquadrati, si è utilizzato un obiettivo con lunghezza focale di 24 mm. Le condizioni di illuminazione fortemente variabili durante le acquisizioni in esterna, strettamente legate alla composizione architettonica delle aree interessate, hanno richiesto una fase di pianificazione della battuta fotografica al fine di evitare zone d'ombra e aree sovraesposte nelle immagini acquisite, eludendo quanto più possibile una correzione radiometrica dei dati in fase di pre-processamento.

Canon EOS 1300D	
Sensor dimensions	22.3 x 14.9
Sensor resolution	18 Mpx
Pixer size	4.3
Lens	Nikkor 18-35
Focal lenght	24 mm

Tab. 8.3. Principali caratteristiche tecniche della fotocamera Reflex Canos EOS 1300D.

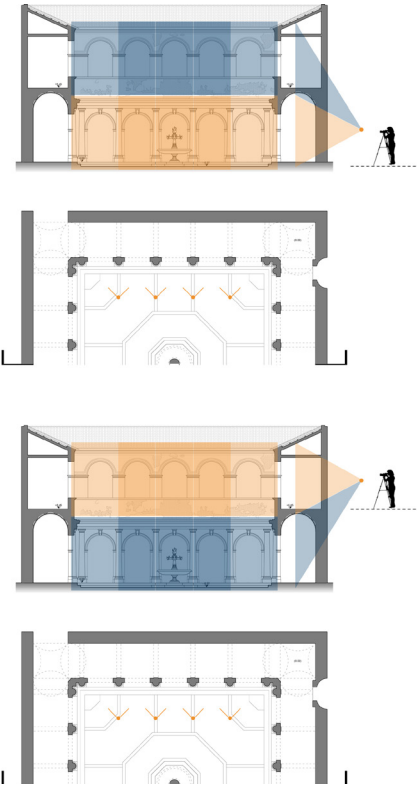


Fig. 8.1.6. Schema di acquisizione dei fotogrammi per il chiostro della foresteria nobile.

	Topcorn GPT 700i
Range measurement accuracy (non-prism)	±5 mm
Range (non-prism)	1.5 to 250 m
Angle measurement accuracy (non-prism)	1''
Tilt correction	Dual-axis
Compensating range	±4''

Tab. 8.4. Principali caratteristiche tecniche della stazione totale TOPCON GPT 700i.

8.1.4 La rete topografica

L'alta risoluzione e accuratezza desiderate per il progetto di ricerca, hanno richiesto un'attenta pianificazione delle fasi di acquisizione e di elaborazione. L'affidabilità dell'intero flusso di lavoro è stata garantita da misure di controllo a terra distribuite quanto più uniformemente possibile sull'area interessata dal rilievo. 12 punti, localizzati nell'area del cortile d'onore e nel piazzale antistante l'ingresso della certosa, a un'altezza variabile tra i 70 cm e 2.45 m, sono stati battuti con una stazione totale TOPCON GPT 700i (tabella 8.4) allo scopo di utilizzarli come *Ground Control Points* - GCPs e *Check Points* - CPs.

La rete di inquadramento è stata acquisita dalla strumentazione collocata in 3 stazioni, situate lungo il percorso di accesso che dal portale di ingresso del cenobio arriva alla facciata d'onore.

Per perfezionare la georeferenziazione delle informazioni spaziali, registrate con l'ausilio di un aeromobile provvisto di ricevitore satellitare GPS/GLONASS (par. 8.1.1), è stata utilizzata una rete di vertici inquadrati in un sistema di coordinate WGS84. Nell'area della certosa di San Lorenzo, a nord del parcheggio e a sud di un campo sportivo, ricade un vertice trigonometrico di seconda specie, n. 504540, materializzato nel 2002 con una borchia metallica regionale infissa sul cordolo di una aiuola. La triangolazione con i vertici n. 504539, ricadente in località Masseria Barra del comune di Padula, e n. 504538, localizzato nel Comune di Sala Consilina in località di San Giovanni in Fonte, ha determinato una prima rete di inquadramento satellitare da cui è stato estratto un reticolo di vertici georeferenziati, distribuiti con passo uniforme e costante nella zona del monastero.

8.1.5 Processamento e integrazione dei dati. Valutazione dei risultati

L'elaborazione dei dati è stata condotta in due fasi: la prima ha visto il processamento puntuale dei diversi datasets, acquisiti con tecniche differenti; la seconda è incentrata sulla successiva integrazione delle informazioni mirata alla produzione di un unico modello digitale capace di coniugare l'accuratezza geometrica con una efficace rappresentazione delle qualità visive dell'architettura.

I dati che è possibile estrarre singolarmente dalle diverse tecniche di rilievo, presentano difatti livelli di soddisfacimento, in relazione alla precisione

geometrica e al realismo della tessitura superficiale, diversificati.

Se il grado di affidabilità e precisione metrica della rappresentazione digitale del laser scanner può considerarsi molto alto, altrettanto non può dirsi del dato colorimetrico che essa fornisce. Al contrario, il modello poliedrico ottenuto con il processo di fotogrammetria risulta generalmente estremamente fotorealistico, a svantaggio di una morfologia di ricostruzione meno dettagliata.

Il metodo perseguito nella ricerca suggerisce l'integrazione dei due corpus di dati. Per il perseguimento dello scopo, sono state testate due differenti metodologie.

- **Allineamento e concatenamento delle scansioni laser**

Le cento range maps, pianificate per acquisire informazioni tridimensionali sulle strutture dei nuclei più significativi e rappresentativi della certosa di San Lorenzo, sono state allineate con il software proprietario Faro Scene². La procedura di allineamento è basata sul riconoscimento automatico dei targets posizionati nella scena al momento della registrazione dei dati. Il software utilizza protocolli di *best-fitting* delle primitive geometriche considerate, generalmente sfere ed elementi piani con scacchiere bicromatiche. Affinché il processo avvenga correttamente, è necessario posizionare nella scena, al momento dell'acquisizione, i targets in posizioni non allineate, non complanari e con distribuzione uniforme. Inoltre, i riferimenti posti ad una distanza superiore ai 20-25 metri, vengono esclusi dalla procedura di allineamento, non potendo fornire una informazione accurata di posizione (si pensi al riconoscimento del centro di un target sferico o della scacchiera, per il quale la distanza massima si riduce in alcuni casi anche a 18 metri). Per un corretto allineamento, almeno tre targets devono essere disposti nell'area di sovrapposizione tra due scansioni successive. Una volta riconosciuti, il software identifica le posizioni tridimensionali degli elementi da allineare, servendosi per l'iniziale rotazione e traslazione delle scansioni rispetto al sistema di riferimento scelto.

Il processamento delle scansioni laser acquisite per il cenobio padulese non ha richiesto particolari accorgimenti. L'allineamento delle nuvole grezze è avvenuto automaticamente, grazie al riconoscimento dei targets posizionati durante la campagna di rilievo, senza la necessità di integrare il numero di riferimenti con l'individuazione manuale di ulteriori punti omologhi. L'unica operazione compiuta è stata l'elaborazione dei dati, raggruppati per ambiente architettonico, attraverso un primo processo di concatenamento delle scansioni all'interno di ciascun gruppo e, successivamente, l'allineamento generale di tutti gli insiemi delle nuvole in

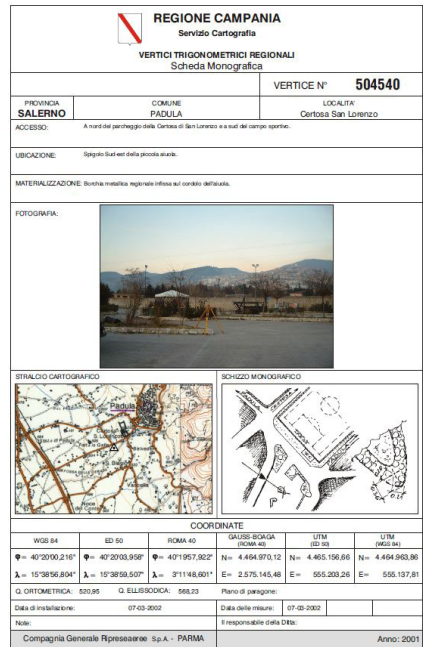


Fig. 8.1.7. Scheda monografica vertice trigonometrico n. 504540.



Fig. 8.1.8. Nuvola di punti finale risultante dal concatenamento delle scansioni laser. Dettaglio della chiesa monastica.



Fig. 8.1.9. Nuvola di punti finale risultante dal concatenamento delle scansioni laser. Dettaglio del chiostro dei Procuratori.

un unico sistema tridimensionale. Tale procedura ha consentito di snellire gli oneri computazionali, velocizzare le fasi di processamento e ridurre eventuali errori di allineamento. La nuvola finale, registrata in Faro Scene, è risultata di circa 36 milioni di punti, con una tensione dei target media di 0.0017, una tensione dei punti di scansione di 0.0004 ed una percentuale di sovrapposizione media del 93%.

• **Orientamento delle immagini e generazione della nuvola fotogrammetrica terrestre**

Il processamento dei dati raccolti con tecnica image-based a quota terrestre, è stato condotto con una applicazione software *Structure from Motion* SfM piuttosto diffusa, Agisoft PhotoScan³.

Per la procedura di orientamento dei datasets fotogrammetrici, sono state utilizzate le sole immagini con parametri di qualità più elevata, stimati in base alla nitidezza della messa a fuoco. Attraverso la creazione di maschere, sono stati esclusi dal processo ricostruttivo elementi di potenziale disturbo e rallentamento del calcolo (cielo, piccole antenne, ...). Con il *Self-Calibration Bundle Adjustment*, i fotogrammi sono stati automaticamente orientati nella scena tridimensionale in virtù della capacità degli algoritmi

Fig. 8.2.0. Nuvola di punti finale risultante dal concatenamento delle scansioni laser.

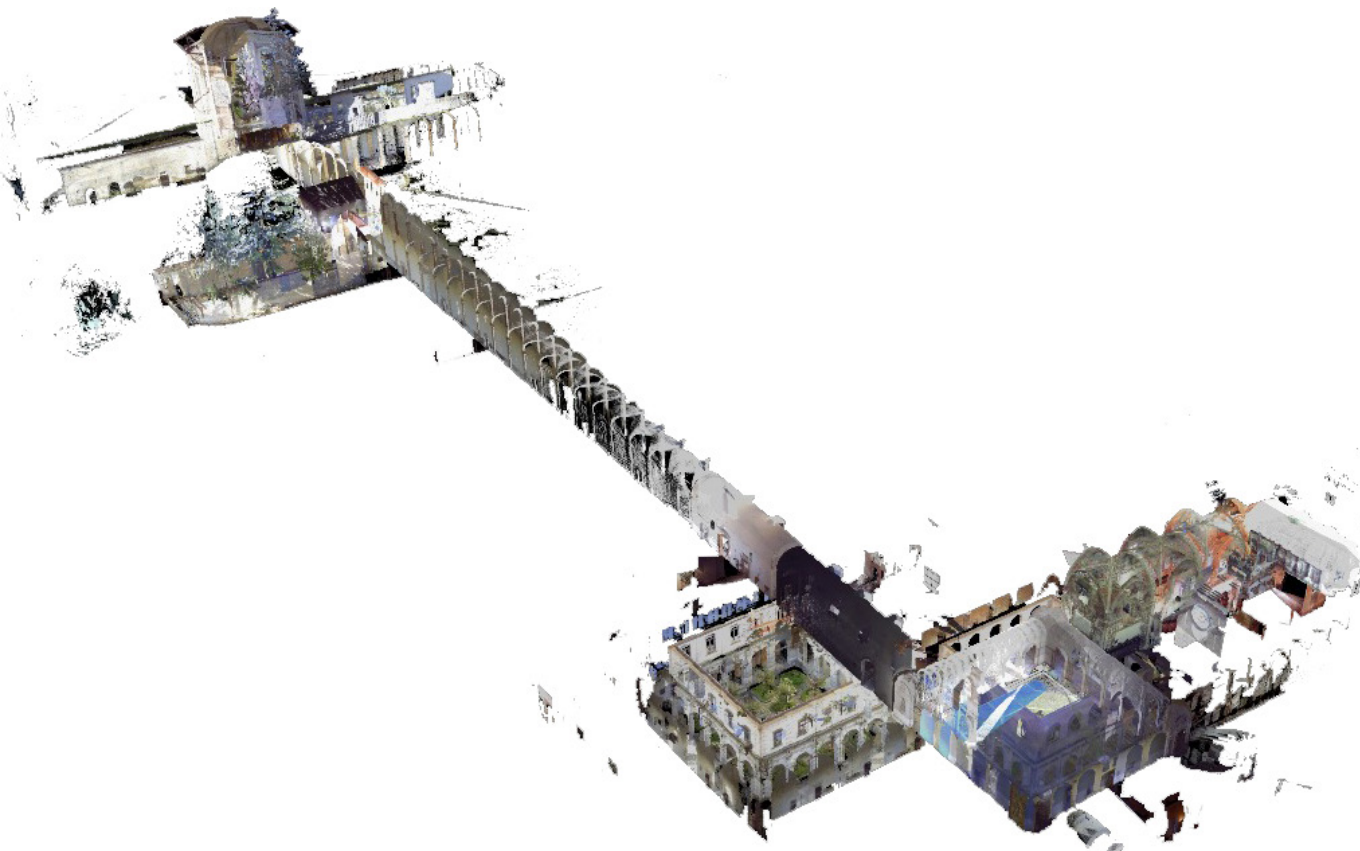


Fig. 8.2.1. Nuvola di punti finale risultante dal processo di fotogrammetria terrestre. Dettaglio della corte d'onore con la facciata principale.

di SfM di stimare simultaneamente i parametri di orientamento interno ed esterno della camera, ossia la struttura tridimensionale della scena - *Structure* - e la posizione del sensore - *Motion* -. Il sistema risolvante ai minimi quadrati, rende la procedura di auto calibrazione della camera piuttosto precisa e soddisfacente. Per implementare il calcolo, è stato utilizzato anche il certificato di calibrazione della fotocamera in modo da raffinare la correzione della distorsione interna dell'ottica. Una nuvola sparsa, aggregato dei *tie points* estratti nella ricerca delle corrispondenze tra i fotogrammi, di 351697 punti è stata generata a valle delle iterazioni di raffinamento dell'auto calibrazione.

La nube è stata filtrata individuando e rimuovendo alcuni punti con un errore di riproiezione⁴ valutato non soddisfacente (2.0 pixels) e riducendo il rumore tramite l'eliminazione di punti il cui posizionamento, essendo visibili in un numero limitato di fotogrammi, è risultato poco accurato.

Completata la procedura di orientamento, in base alle posizioni stimate della camera, sono state calcolate le informazioni di profondità per ogni immagine e combinate in una singola nuvola di punti, più fitta della precedente. Una nuvola densa di 253639212 punti è stata processata con algoritmi di *Dense Image Matching*, impostando il parametro della qualità sul valore massimo - *High* - in considerazione che una maggiore qualità, benché comporti un allungamento dei tempi di processamento, garantisce una ricostruzione dei dettagli più precisa e una geometria in generale più accurata.

Una osservazione a margine sulla procedura adottata riguarda la scelta di condurre i passaggi sopra menzionati per i diversi datasets acquisiti, considerandoli prima singolarmente, e successivamente allineati e uniti, tramite markers.

• **Processamento dei datasets fotogrammetrici aerei**

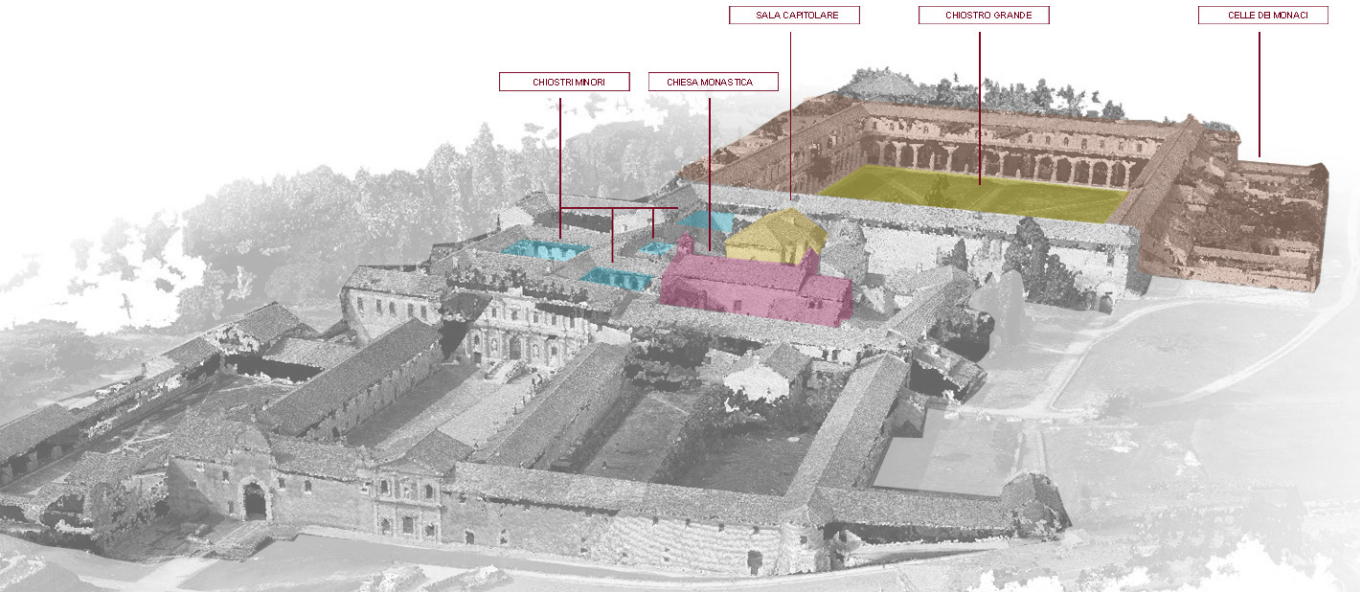
L’elaborazione delle immagini aeree acquisite tramite SAPR ha seguito la *pipeline* fotogrammetrica standard, descritta nelle sue fasi salienti al punto precedente. In primo luogo, un consistente numero di maschere è stato applicato ai fotogrammi per escludere dal processo di ricostruzione elementi la cui geometria avrebbe comportato un’eccessiva dilatazione dei tempi di calcolo senza, tuttavia, contribuire alla definizione dell’architettura (per esempio, la vegetazione, gli alberi, il costruito esterno all’area di interesse ma comunque catturato negli scatti fotografici). Successivamente, il blocco fotografico è stato triangolato utilizzando gli strumenti di orientamento automatico delle immagini di *Structure from Motion*. Una nuvola di punti densa finale di circa 122 milioni di punti è stata ottenuta dall’allineamento e unione dei sei datasets di partenza.

• **Procedure per l’integrazione dei dati**

L’integrazione tra le nuvole di punti acquisite con i diversi sensori ottici, attivi e passivi, è stata realizzata in due fasi.

La prima integrazione è stata effettuata tra la nuvola del laser scanner e quella fotogrammetrica terrestre, assumendo come sistema di riferimento il dato ottenuto dalla scansione laser e applicando delle roto-trasformazioni spaziali alla nuvola di punti fotogrammetrica. Le coordinate cartesiane (x,y,z) di alcuni punti ben riconoscibili e distribuiti nel modello laser scanner sono state preliminarmente identificate. Contestualmente, i punti corrispondenti, visibili nelle immagini dei diversi datasets, sono stati

Fig. 8.2.2. Nuvola di punti finale risultante dal processo di fotogrammetria aerea. Indicazione di alcuni degli ambienti approfonditi con altre procedure di rilevamento.



contrassegnati nella rappresentazione fotogrammetrica come markers. I valori di posizione estratti dalla nuvola di scansione sono stati dunque assegnati ai riferimenti, consentendo la rotazione e traslazione del modello fotogrammetrico nel nuovo sistema di riferimento, relativo⁵.

Per migliorare l’allineamento, i modelli tridimensionali, che condividono ora lo stesso orientamento spaziale, sono stati importati nel software Innometric Polywork⁶. Utilizzando un algoritmo *Iterative Closest Point* - ICP, l’accostamento è stato ottimizzato assumendo come riferimento la nuvola di punti del laser scanner. L’accuratezza della procedura di integrazione è stata valutata con riferimento ai valori di deviazione standard: la maggiore differenza, espressa in termini di distanza lineare, è nell’ordine di 1.2 cm, registrata in prossimità dei bordi dei modelli e in zone con ombre portate a causa di condizioni di illuminazione non ottimale.

Il secondo passaggio ha interessato la georeferenziazione dei dati spaziali e la ottimizzazione della scala su base topografica.

La nuvola di punti fotogrammetrica, processata dai datasets catturati con il SAPR, è stata assunta come punto di partenza. Le informazioni fotografiche possiedono già una prima registrazione in termini di coordinate geografiche in ragione della presenza, sull’aeromobile, di un sistema di ricezione satellitare GPS/GLONASS. Il dato aereo è stato ottimizzato utilizzando i punti di riferimento, misurati con la stazione totale, per il ridimensionamento e la scala del modello. Le coordinate tridimensionali dei GCPs sono state determinate con valori di accuratezza media di 5 millimetri e selezionate come riferimento per la trasformazione rigida della nuvola fotogrammetrica.

In aggiunta, i punti di controllo sono stati integrati con informazioni di geolocalizzazione desunte dall’estrazione in ambiente QGis⁷ di vertici georiferiti, a partire dalla rete di inquadramento di secondo livello istituita tra tre capisaldi trigonometrici fissati dall’IGM. La procedura ha fornito una precisione inferiore al centimetro ed un modello riferito al sistema UTM/WGS84.

• **Osservazioni e ottimizzazione del processo di integrazione**

Per lo scopo della ricerca, i dati tridimensionali fin qui integrati richiedono una ulteriore elaborazione, finalizzata alla generazione di un modello poligonale, texturizzato, a partire dalla nuvola di punti.

La metodologia condotta e descritta sino a questo punto, è in linea con i protocolli oggi più diffusi. Tuttavia, come è emerso, il processo consta di diversi passaggi da effettuare in specifici applicativi, diversi tra loro.

Negli ultimi due anni, sono state sviluppate nuove soluzioni commerciali

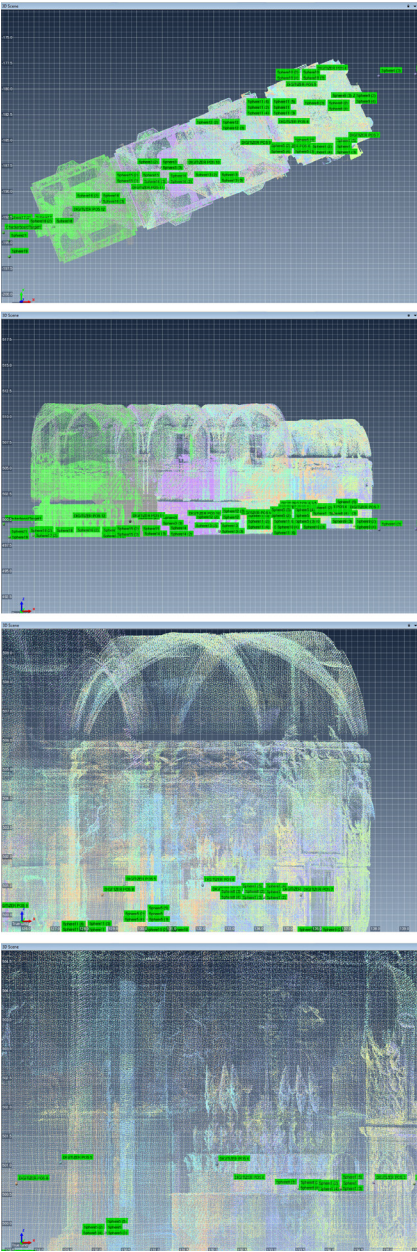


Fig. 8.2.3. Perfezionamento dell’allineamento tra i diversi datasets, condotto in Polyworks. Dettaglio della chiesa monastica.

capaci di elaborare, in maniera contestuale, sia i dati acquisiti da sensori attivi che le informazioni registrate con tecniche image-based. L'integrazione dei dati consentita, spazia dalla generazione di una unica nuvola di punti al processamento di un modello poligonale, in cui tutte le categorie di informazioni possono essere selezionate per concorrere alla ricostruzione delle superfici poliedriche. La texturizzazione del modello digitale può essere selettivamente condotta a partire dalla proiezione delle sole immagini, catturate con la camera solidale allo scanner oppure integrare le stesse con gli scatti di fotocamere professionali.

Per ottimizzare, dunque, il processo di connessione dei dati, sfruttando le nuove possibilità offerte dall'avanzamento tecnologico/informatico, si è deciso di sperimentare l'applicativo RealityCapture⁸ della Capturing Reality.

Una premessa è necessaria: di seguito si riportano i risultati relativi al processamento dei dati della chiesa monastica della certosa, su cui la successiva sperimentazione del metodo di annotazione semantica (cap. 10) si è focalizzata. È inteso, tuttavia, che il processo è stato esteso a tutto il complesso monastico.

A partire dal reticolo di vertici estratti per la georeferenziazione, per ciascun punto sono state registrate le coordinate in un file in formato .txt. Il listato è stato importato in un progetto vuoto di RealityCapture in cui il corrispondente sistema di riferimento di coordinate è stato impostato: epsg:32366 - WGS84/ UTM zone 33N. I vertici, una volta caricati, sono stati registrati come GCPs. Per verificare e validare il posizionamento dei punti di controllo, ci si è serviti di immagini satellitari, caricate e ispezionate direttamente nell'applicativo attraverso il provider Mapbox⁹. Il posizionamento dei GCPs è risultato corretto.

Sia le scansioni laser che le fotografie acquisite sono state importanti nel medesimo progetto.

In particolare, le range maps sono state, prima, allineate nel software Faro Scene, come indicato al primo punto di questo paragrafo, e successivamente importate in RealityCapture come formato .ptx. Con l'obiettivo di georeferenziare tutti i dati e, quindi, il modello finale risultante, si è impostato il parametro relativo alla relazione intercorrente tra le scansioni da importare, su 'Draft' indicante che le stazioni del laser sono state registrate ma la registrazione richiede di essere raffinata. Le informazioni sull'intensità delle scansioni sono state acquisite contestualmente alle indicazioni colorimetriche.

Allo stesso modo, sono stati importati i fotogrammi acquisiti con il sensore

passivo.

Entrambi i datasets sono stati sottoposti a un primo processo di allineamento per la computazione automatica della loro posizione ed orientamento nella scena. La stima dei parametri interni ed esterni nonché la correlazione tra le range maps del laser e le immagini fotografiche è effettuata dall'applicativo secondo i principi esplicitati nel cap.4.

Una prima rappresentazione tridimensionale, discretizzata in punti con una iniziale indicazione di colore, è stata calcolata. Per l'ambiente della chiesa dei certosini, i dati di partenza sono stati allineati in un unico 'componente', consistente in 11 stazioni registrate, 527 fotogrammi importati e 60 file LSP¹⁰. 418593687 *tie points* sono stati estratti.

Dopo il preliminare processo di allineamento, sia le scansioni che i fotogrammi sono stati definitivamente registrati imponendo, in un aggiornamento dell'allineamento, di considerare come vincoli - *constraints* - i GCPs precedentemente collocati. La nuvola di punti calcolata è risultata in questo modo geo riferita, computata in unità di distanza metriche e allineata in accordo ai riferimenti GPS, con una deviazione totale media per ciascun punto di controllo a terra di 0.01 m. Per raffinare la successiva computazione del modello finale, sono stati inseriti come ulteriori punti di controllo CPs, i vertici della rete topografica, individuando gli stessi a partire dalle immagini e servendosi contestualmente della loro visualizzazione nella scena 3D. Servendosi dei suggerimenti di misura calcolati in automatico dal software sulla base delle osservazioni riscontrate per ciascun CPs, le distanze sono state sistemate sulla base dei valori acquisiti sul campo con la stazione totale.

Per ottenere un modello digitale tridimensionale da utilizzare per la procedura di strutturazione semantica, due ulteriori fasi di *3D Modeling* sono state necessarie: la generazione di un modello poligonale dalla

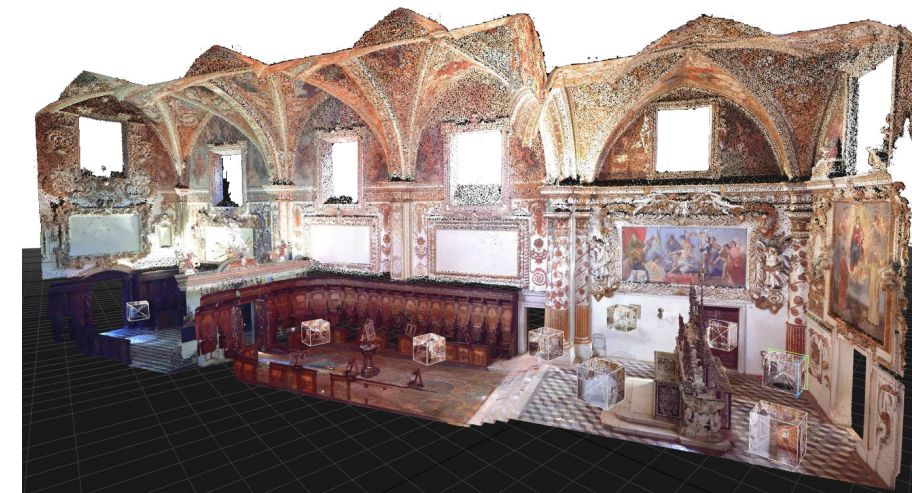


Fig. 8.2.4. Allineamento delle scansioni laser e fotogrammi terrestri relativi alla chiesa della certosa di San Lorenzo, in RealityCapture.

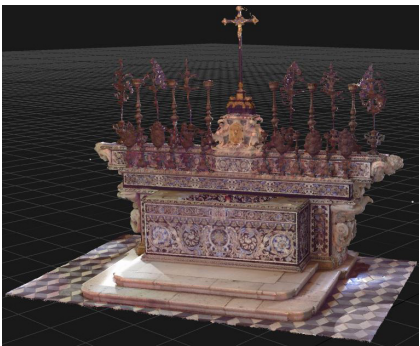


Fig. 8.2.5. Nuvola di punti finale risultante dall'integrazione di tutti i datasets in Reality Capture. Particolare dell'altare maggiore.

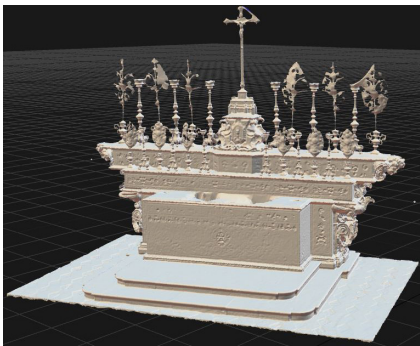


Fig. 8.2.6. Modello poligonale finale risultante dall'integrazione di tutti i datasets in Reality Capture. Particolare dell'altare maggiore.

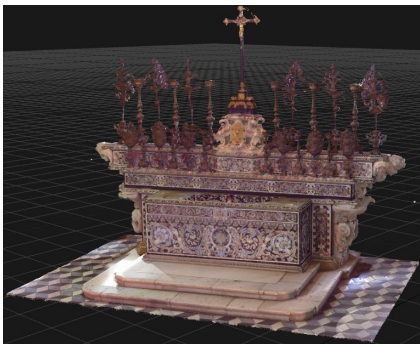


Fig. 8.2.7. Modello poligonale finale, texturizzato, risultante dall'integrazione di tutti i datasets in Reality Capture. Particolare dell'altare maggiore.

nuvola di punti e la sua successiva texturizzazione. Definita la regione di ricostruzione spaziale, che consente già di escludere dal calcolo eventuali punti spuri, topologicamente incoerenti, sono stati precisati i parametri computazionali. Al fine di ottenere un modello tridimensionale già in prima battuta, gestibile per le fasi a seguire, considerando l'enorme mole di dati raccolti, si è scelto di triangolare una nuvola di punti leggermente sotto-campionata. La densità della nube è stata filtrata stabilendo una distanza minima tra due punti successivi pari a 0.002 m e imponendo di scartare i punti con una intensità inferiore a 0.03 perché ritenuti poco accurati. A partire dal dato snellito, è stata generata la superficie poligonale scegliendo come informazioni da considerare per la ricostruzione le scansioni laser e indicando all'applicativo di tenere in conto nel processo solo quelle immagini scattate a copertura di aree non registrate con il laser. La scelta è stata motivata dalla volontà di ottenere una mesh triangolare contraddistinta da una geometria quanto più accurata e precisa possibile. La maglia poliedrica finale conta 216421705 triangoli e 108468767 vertici, con un dettaglio di 2 mm.

L'ultima fase della modellazione tridimensionale ha riguardato la texturizzazione della mesh editata. La procedura di estrazione di texture e mappatura del modello, si è basata sulla assegnazione, automaticamente condotta dagli algoritmi del software, delle informazioni provenienti dalle immagini bidimensionali alla geometria tridimensionale. L'associazione è possibile grazie alla coerenza geometrica stabilita tra i fotogrammi e la mesh, ricostruita a partire dall'allineamento e registrazione spaziale degli stessi.

In prima istanza, sono state aggiunte al modello le informazioni di colore, settando il metodo di calcolo su 'multi-band' allo scopo di conseguire un output di massima qualità, sebbene in tempi di processamento più lunghi. Tale metodo, difatti, usa diversi canali a partire dalla divisione delle immagini in più frequenze, unite insieme successivamente. Le frequenze più basse, che possono essere unite linearmente nel caso di grandi aree, forniscono informazioni su colore e luminosità. Le frequenze più alte contengono i dettagli, ad esempio le dimensioni della grana e sono unite in un modo ottimizzato differente. Il *downscale* delle immagini per il processo di *coloring* è stato impostato a 2^{11} , per velocizzare il processo, abilitando la funzione di riempimento intuitiva delle parti non perfettamente coperte da una camera o da una scansione.

Per la texturizzazione, è stata stabilita la massima risoluzione delle texture, pari a 16384x16384, una riduzione delle immagini prima del *texturing* pari a 2 e il riempimento intuitivo delle parti non incluse dalla sovrapposizione dei dati colorimetrici. Nell'operazione di estrazione delle

texture, l'applicativo ha ricercato e isolato le parti delle immagini che corrispondono alle geometrie del modello 3D. Nel mapping, i contorni del modello sono stati proiettati sull'immagine e sono state assegnate le coordinate UV della texture alla geometria. Per migliorare la qualità del dato di colore, si è deciso di ricolorare il modello, dopo la texturizzazione, raffinando l'informazione colorimetrica dei vertici della maglia.

Il processo è stato effettuato due volte: la prima sfruttando come dati di partenza sia le immagini acquisite dalla camera solidale al laser scanner che le foto scattate con fotocamere esterne; la seconda selezionando per il calcolo i soli fotogrammi dei sensori attivi. I risultati migliori sono stati quelli conseguiti con la seconda impostazione.

8.2 Processi di semplificazione e gestione del modello digitale

Ottenuto un unico modello digitale integrato, lo studio si è interrogato sulla necessità di filtrare, decimare e pulire i dati ottenuti, in funzione di una loro adeguata utilizzazione in banche dati condivise.

Spingere l'acquisizione geometrica verso livelli estremi di dettaglio e accuratezza indiscriminati non ha senso se determina modelli che risultano, a causa del considerevole numero di poligoni che li costituisce, praticamente ingestibili dai software e dal Web per la loro pesantezza.

Un modello digitale polifunzionale, in grado di rispondere sia ad esigenze di documentazione che di disseminazione e analisi scientifica, necessita di un numero piuttosto contenuto di poligoni, in grado di rappresentare adeguatamente la geometria dell'oggetto e, allo stesso tempo, di favorire la fruizione interattiva in applicazioni *real-time*. Modelli densi sono inadatti a questo scopo, considerando il rallentamento e le limitazioni nell'importazione di queste rappresentazioni nelle scene per la navigazione interattiva così come nel loro deposito in banche dati.

8.2.1 Riduzione della maglia poligonale

L'approccio ritenuto più ragionevole e perseguito nell'ambito della ricerca che si presenta, ha mirato alla semplificazione selettiva del livello di specificazione più adatto per le varie porzioni della rappresentazione. Dato il modello poliedrico (che si ricorda essere, per esemplificazione, in questa sede, il modello della chiesa della certosa di Padula), il numero di

poligoni che lo compongono è stato ridotto con la logica di mantenere il massimo livello di dettaglio solo sulle sezioni che lo richiedono, snellendo la computazione delle superfici in tutte le altre aree che non presentano attributi così specifici.

In primo luogo, per ottimizzare la gestione computazionale del modello durante il *rendering online*, invece di lavorare su una mesh unica, il processo di esportazione da RealityCapture è stato impostato in modo da dividere il risultato in sotto parti. Ogni parte è stata definita da una suddivisione automatica della maglia utilizzando un vincolo di raggruppamento di un massimo di 5 milioni di vertici per sotto parte. La mesh della chiesa, distinta in 66 parti, è stata esportata nelle sue componenti in formato .ply.

La procedura di semplificazione è stata eseguita nell'applicativo *open source* Meshlab¹², perseguendo l'ottimizzazione geometrica dei modelli attraverso un algoritmo di *vertex merging*, il *Quadric Edge Collapse Decimation* (par. 5.1.2). Il sistema di calcolo implementato nel software è una derivazione del lavoro proposto da Garland e Heckbert nel 1997¹³ ed è stato preferito come metodo di semplificazione della maglia poligonale poiché rappresenta un buon compromesso fra robustezza, velocità e resa finale.

A partire dall'importazione del file .ply, l'algoritmo effettua iterativamente l'unione di coppie di vertici, unite da un lato. A livello teorico, le coppie di vertici eleggibili per essere unite sono tutte quelle unite da un lato ed anche tutte quelle distanti meno di un certo valore di tolleranza t , fissato dall'utente. In Meshlab, i parametri di controllo non consentono di impostare questo valore ma permettono di agire in maniera controllata su una serie di ulteriori aspetti che rientrano nel processo computazionale.

Nello specifico, decidendo di demandare al calcolo automatico il numero di facce da ottenere a valle della semplificazione, è stata impostata la percentuale di riduzione del modello ponendola pari a 0.01. Come si dirà nel paragrafo successivo, è stato condotto il processo imponendo un valore percentuale di riduzione della grandezza finale della mesh anche pari a 0.1 e 0.05, ritenendo il risultato più soddisfacente quello conseguito con il valore di 0.01. Per approssimare accuratamente la forma originale, nel modello semplificato è stata fissata una soglia della qualità di 0.3, in un intervallo [0,1] in modo da far computare solo triangoli ben sagomati e al massimo le facce con una penalizzazione della sagoma in proporzione alla loro forma, inferiore al valore stabilito.

Il controllo della procedura iterativa ha interessato contestualmente il rispetto dei bordi, delle normali, della topologia e l'ottimizzazione della posizione dei vertici semplificati.

Impostati i parametri e i vincoli di calcolo, l'algoritmo ha calcolato l'errore

E_j - chiamato *quadric error metric* QEM - relativo ad ogni vertice p_j , come distanza vertice-piano, secondo la formula

$$E_j(p_j) = \sum_{i=1}^n (n_i p_j - d_i) \quad (8.15)$$

L'operazione è stata eseguita tramite una sommatoria su tutte le facce adiacenti a p_j . Quando lo spigolo tra due vertici p e q è stato collassato, il quadric error per il nuovo vertice r è stato computato come

$$E_r = (E_p + E_q)/2 \quad (8.16)$$

I valori sono stati conservati all'interno di una matrice 4x4, rappresentante la somma delle distanze al quadrato del vertice dai piani dei triangoli in esso incidenti. L'errore introdotto dall'operazione di *vertex merging* è stato associato al nuovo vertice, ed è semplicemente la somma delle matrici dei vertici appena uniti. All'inizio tutte le coppie di vertici sono state ordinate in una coda a priorità a seconda dell'errore che si sarebbe introdurrebbe a seguito di una loro eventuale unione. L'algoritmo quindi, ha unito prima la coppia che ha introdotto l'errore minimo, ha aggiornato la coda di conseguenza e ha ripetuto l'operazione fino a quando non ci sono state più coppie valide.

Nella selezione delle coppie di vertici eleggibili per il clustering, in virtù dei vincoli imposti, il processo ha rimosso il minor numero di punti possibili dal bordo della maglia ed ha selezionato i vertici da raggruppare con riguardo al genere topologico della mesh originale, in modo da non introdurre errori e cambiamenti.

Ogni vertice collassato è stato posizionato allo scopo di minimizzare l'errore quadratico, calcolando la posizione ottimale per il nuovo vertice r secondo la risoluzione della formula

$$\left(\sum_{i=1}^n (n_i n_i^T) \right) = \left(\sum_{i=1}^n (n_i d_i) \right) \quad (8.17)$$

Come precedentemente accennato, per snellire gli oneri computazionali, il modello complessivo della chiesa è stato scomposto in parti. La metodologia di riduzione è stata applicata a ciascuna delle 66 componenti e condotta, per velocizzare il processo, scrivendo uno *script* in Python per eseguire tutti i processi in *batch*.

Per esemplificazione, si riportano i risultati ottenuti per una parte del modello della chiesa, relativa all’altare maggiore.

A partire dalla maglia high poly, di 2624547 vertici e 5237142 triangoli (Figura 8.2.8), è stata ottenuta una mesh semplificata - low poly - con 32130 vertici e 52370 poligoni (Figura 8.2.9), imponendo una percentuale di riduzione di 0.01, una soglia di qualità di 0.3 e un peso - *weight* - per l’importanza durante il processo dei bordi pari a 1, in un intervallo [1,0], corrispondente alla massima rilevanza. Una operazione addizionale di pulizia del modello ridotto è stata effettuata per assicurare la rimozione di vertici senza riferimenti, triangoli dalla forma penalizzante, e così via.



Fig. 8.2.8. Maglia poligonale - high poly - dell'altare maggiore della chiesa monastica.

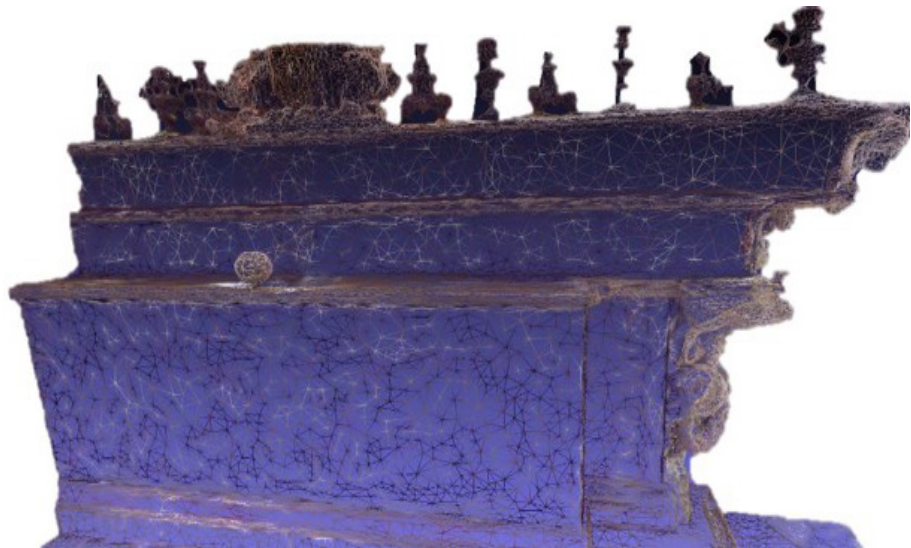


Fig. 8.2.9. Maglia poligonale ridotta - low poly - dell'altare maggiore della chiesa monastica.

8.2.2 Valutazione dell’errore di approssimazione

La scelta di un algoritmo di semplificazione non è mai banale poiché, in relazione alla finalità del progetto, spesso è necessario mantenere una certa accuratezza nel modello semplificato. L’obiettivo di documentazione e analisi della ricerca proposta impone il rispetto di un livello di fedeltà e precisione geometrica della maglia ridotta piuttosto elevato. Per valutare l’errore commesso a seguito del progetto di semplificazione del modello originale, è stata calcolata la distanza di Hausdorff.

La deviazione tra i vertici della mesh low poly e la superficie high poly è stimata considerando, secondo l’approccio teorico, due insiemi di punti A e B, corrispondenti ai due modelli poligonali, e valutando sia la distanza di ogni punto a di A dal più vicino punto b di B che la misura inversa. Nello specifico, siano A e B due insiemi di punti non vuoti di uno spazio metrico (M; d)¹⁴. L’espressione

$$\inf_{b \in B} d(a, b)$$

definisce che la distanza da un punto arbitrario a di A dall’insieme B è la misura della distanza intercorrente tra a e il punto più vicino b di B. Dal momento che potrebbe non esserci un punto più vicino, dal punto di vista matematico il calcolo considera l’estremo inferiore - *infimum* - al posto del minimo. Analogamente, la formula

$$\sup_{a \in A} \inf_{b \in B} d(a, b)$$

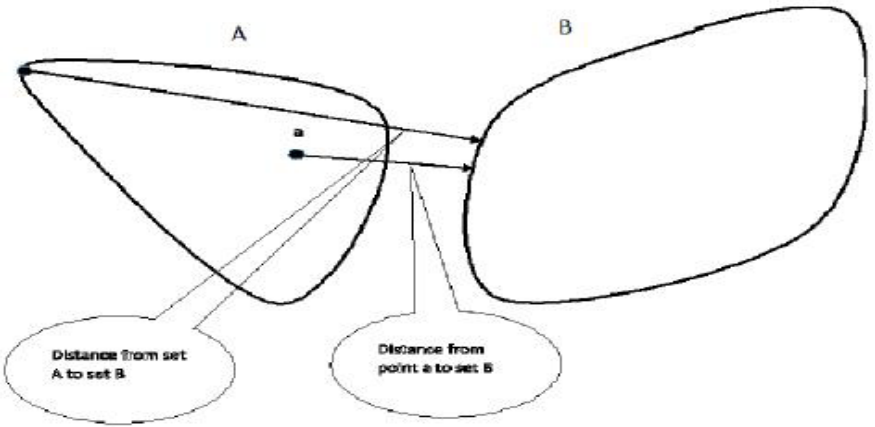


Fig. 8.3.0. Modello teorico per il calcolo della distanza di Hausdorff.

Definisce la distanza da A a B come la distanza dal punto più lontano a di A all'insieme B. Siccome potrebbe non esserci alcun punto più lontano, viene stimato l'estremo superiore - *supremum* - in luogo del massimo. Da queste premesse, la distanza di Hausdorff tra due insiemi, coincidenti nel caso in esame con due meshes, è il valore massimo calcolato tra le due distanze da A a B e da B a A.

$$d_H(A, B) = \max \left\{ \sup_{a \in A} \inf_{b \in B} d(a, b), \sup_{b \in B} \inf_{a \in A} d(a, b) \right\}$$

Per tutte le maglie poligonali semplificate, è stato valutato l'errore di approssimazione con Hausdorff, all'interno dell'ambiente di Meshlab. Il programma calcola solo una delle due distanze, indicate in 8.18 e 8.19, essendo le due misure non sono simmetriche in virtù della mesh impostata come insieme A o B. Il compito di stimare il valore massimo delle due misurazioni, 8.20, è lasciato all'utente.

Con riferimento ai due modelli, low poly e high poly, dell'altare della chiesa del cenobio padulese, è stata dapprima calcolata la distanza imponendo come *target mesh* la maglia ridotta. L'esito della computazione ha riportato i valori: min = 0.000000 m; max = 0.005779 m; mean = 0.000093 m; RMS = 0.000134 m. Il processo inverso, con target mesh il modello originale, ha restituito le misure di min = 0.000000 m; max = 0.000526 m; mean =

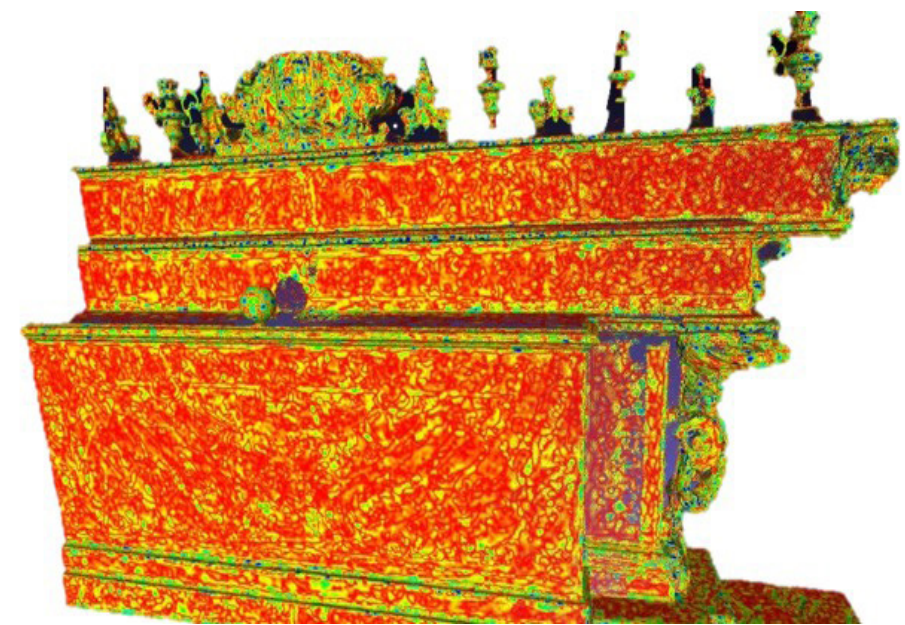


Fig. 8.3.1. Verifica dell'errore di semplificazione tramite calcolo della distanza di Hausdorff.

0.000021 m; RMS = 0.000032 m.

Applicando il filtro *Colorize by Vertex Quality* di Meshlab, è stato possibile controllare visivamente l'esito della computazione mappando i vertici del modello semplificato con indicazioni colorimetriche in una scala Rosso - Verde - Blu in cui il rosso indica la deviazione minima, il blu quella massima¹⁵ (Figura 8.3.1).

Reiterando il calcolo per tutte le parti in cui è stato scomposto il modello completo della chiesa, l'errore di approssimazione finale è risultato inferiore a 1 cm.

Anche in questo caso, per velocizzare il processo, è stato scritto uno *script* in Python per eseguire tutta la procedura in *batch*.

8.2.3 Recupero del dettaglio tramite texture baking

Per non compromettere la foto-realisticità dei modelli, a seguito dell'operazione di riduzione praticata, sono state proiettate, sulle zone interessate da semplificazione della maglia poliedrica, texture con un alto livello di dettaglio, ottenute mediante processi di texture baking (par. 5.2). Si è trattato, in pratica, di processare i modelli con differenti gradi di complessità poligonale da cui sono state estratte differenti mappe che hanno consentito di riproiettare su ciascuno di essi una texture, indipendentemente dal livello di dettaglio superficiale.

Per mantenere la fedeltà geometrica anche nel *task* di visualizzazione, si è compensato l'errore di semplificazione calcolando, con il software Blender¹⁶, la mappa delle normali risultanti dal confronto tra la mesh high poly e quella low poly. Seguendo lo stesso approccio di baking, le informazioni sul colore sono state elaborate utilizzando la maglia ad alto contenuto poligonale. In questo modo, anche se alcuni dati geometrici sono stati persi durante la decimazione, il comportamento della luce simulato nei motori di visualizzazione e rendering, tiene conto dell'effetto dei dettagli rimossi.

È evidente che da un punto di vista della documentazione del patrimonio culturale, è opportuno preservare sia la fedeltà geometrica che l'esperienza visiva dell'architettura. Considerando che l'errore delle misure acquisite con il laser scanner è di circa 2 mm, per motivi di documentazione geometrica un errore di 1 cm è considerato significativo. Per questo motivo, la mesh ad alta risoluzione deve essere sempre memorizzata nelle banche dati. D'altra parte, per documentare l'esperienza visiva, è solo necessario mantenere



Fig. 8.3.2. Modello high poly dello scalone monumentale della certosa di Padula. Dettaglio.

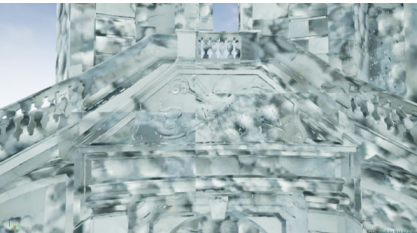


Fig. 8.3.3. Modello low poly dello scalone monumentale della certosa di Padula. Dettaglio.



Fig. 8.3.4. Mappa del colore di un dettaglio dello scalone monumentale della certosa di Padula. La mappa è ottenuta comparando i modelli high poly e low poly dello scalone, nel processo di texture baking.



Fig. 8.3.5. Modello low poly dello scalone monumentale della certosa di Padula con applicata la mappa del colore. Dettaglio.

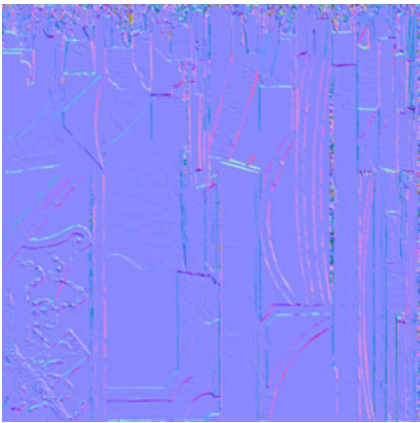


Fig. 8.3.6. Mappa delle normali di un dettaglio dello scalone monumentale della certosa di Padula. La mappa è ottenuta comparando i modelli high poly e low poly dello scalone, nel processo di texture baking.



Fig. 8.3.7. Modello low poly dello scalone monumentale della certosa di Padula con applicate la mappa del colore e delle normali. Dettaglio.



Fig. 8.3.8. Modello low poly dello scalone monumentale della certosa di Padula con applicate la mappa del colore, delle normali e dell'ambient occlusion. Dettaglio.

l'effetto che la geometria ha sull'illuminazione dell'oggetto nella scena. Le mappe delle normali consentono di mantenere questi effetti, anche se la geometria originale non è presente nella mesh low poly, e lascia che un motore di rendering mantenga alti i *frame rates*.

Per migliorare la qualità finale dei modelli tridimensionali durante la visualizzazione, sono state calcolate anche le mappe di Ambient Occlusion. Per il texture baking, al fine di ridurre i tempi di calcolo, è stato scritto similmente alle fasi descritte in precedenza, uno *script* in Python per eseguire tutta la procedura in *batch*. Le mappe sono state salvate tutte in formato .png e la maglia poligonale semplificata è stata nuovamente esportata da Blender in formato .fbx, per il suo utilizzo in cap. 11.

In conclusione, attraverso il processo di texture baking, è stato possibile mappare le differenze intercorrenti tra le due maglie poligonali, recuperando i dettagli persi nella procedura di semplificazione mediante la simulazione del loro comportamento.

Note

- 1 La lunghezza focale effettiva è di 3.57mm.
- 2 <https://www.faro.com/it-it/prodotti/design-del-prodotto/faro-scene/>
- 3 <http://www.agisoft.com/>
- 4 Errore geometrico che corrisponde alla distanza, nel piano immagine, del punto proiettato rispetto a quello misurato.
- 5 La relatività del sistema di orientamento risiede nell'aver assunto come riferimento misure di distanza estratte dal laser scanner, un sistema quindi "locale", senza relazione con la georeferenziazione territoriale.
- 6 <https://www.innovmetric.com/it>. Si ringrazia il Laboratorio de Fotogrammetria Arquitectonica della Universidad de Valladolid per la possibilità di utilizzare il software Polyworks, edizione 2012.
- 7 <https://www.qgis.org/it/site/>
- 8 <https://www.capturingreality.com/>
- 9 <https://www.mapbox.com/>
- 10 RealityCapture supporta i formati di file di scansione laser PTX e E57. Il processo di importazione converte le scansioni laser in un formato interno con estensione .lsp, molto più leggero rispetto al file di partenza. Ad esempio, per una singola scansione della navata ad aula unica della chiesa monastica, di peso pari a 1908846 KB, il software ha generato 6 lsp per un peso totale di 431.471 KB. La procedura consente, in tal modo, di caricare

solo i file .lsp tutte le volte che si ha la necessità di lavorare con gli stessi dati laser, con un notevole vantaggio in termini di memoria e pesantezza dei file.

11 Un downscale pari a 2 significa che ogni lato di ciascun fotogramma può essere 2 volte più piccolo quindi una riduzione del 25% della risoluzione dell'immagine di partenza.

12 <http://www.meshlab.net/>

13 Garland, M. e Heckbert, P. S., "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics", Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH '97, ACM, 1997. Pp. 209-216.

14 Nelle scienze matematiche, uno spazio metrico è un insieme per il quale la distanza d tra tutti i suoi membri M è definita.

15 <http://meshlabstuff.blogspot.com/2010/01/measuring-difference-between-two-meshes.html>

16 <https://www.blender.org/>

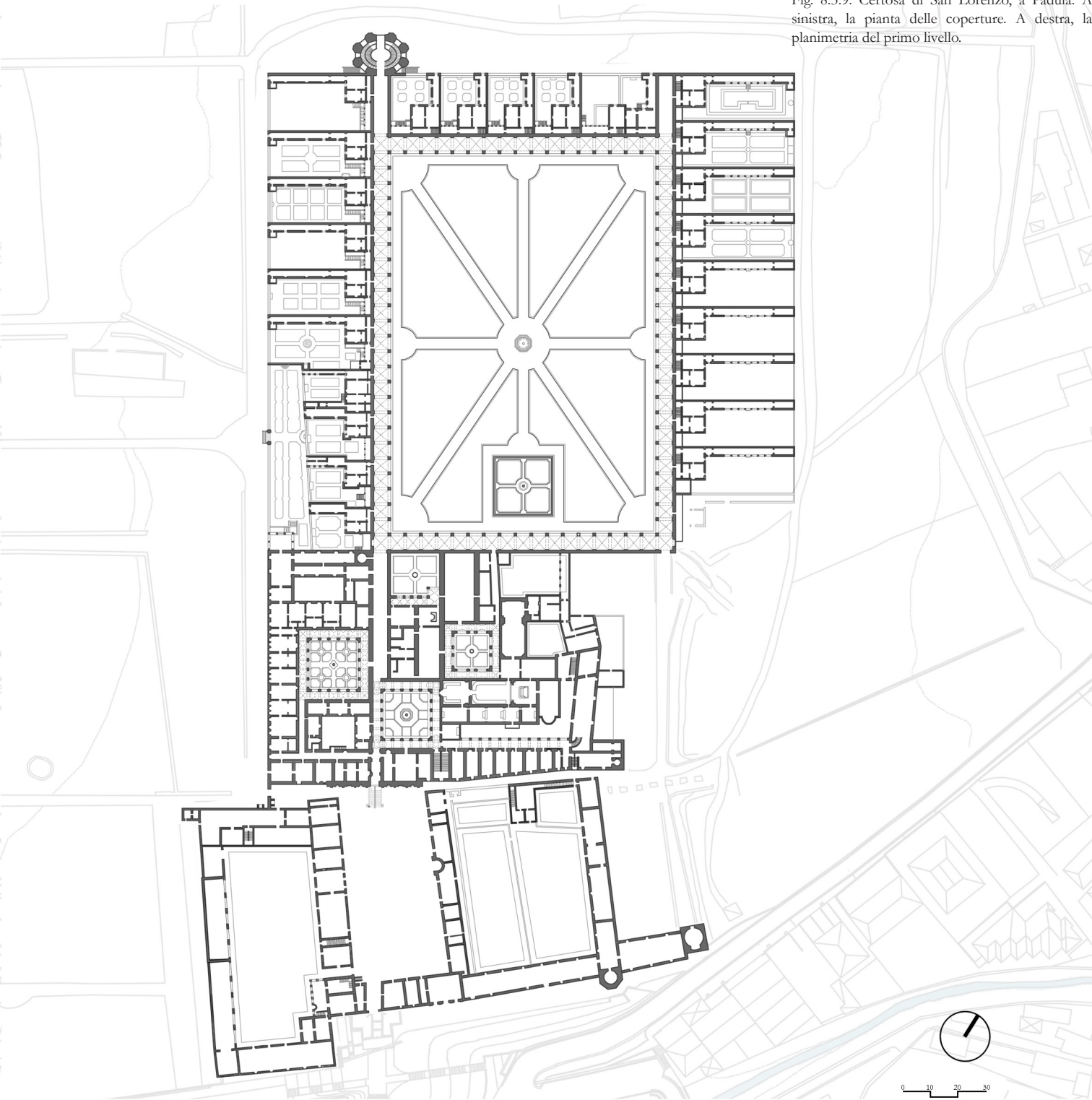
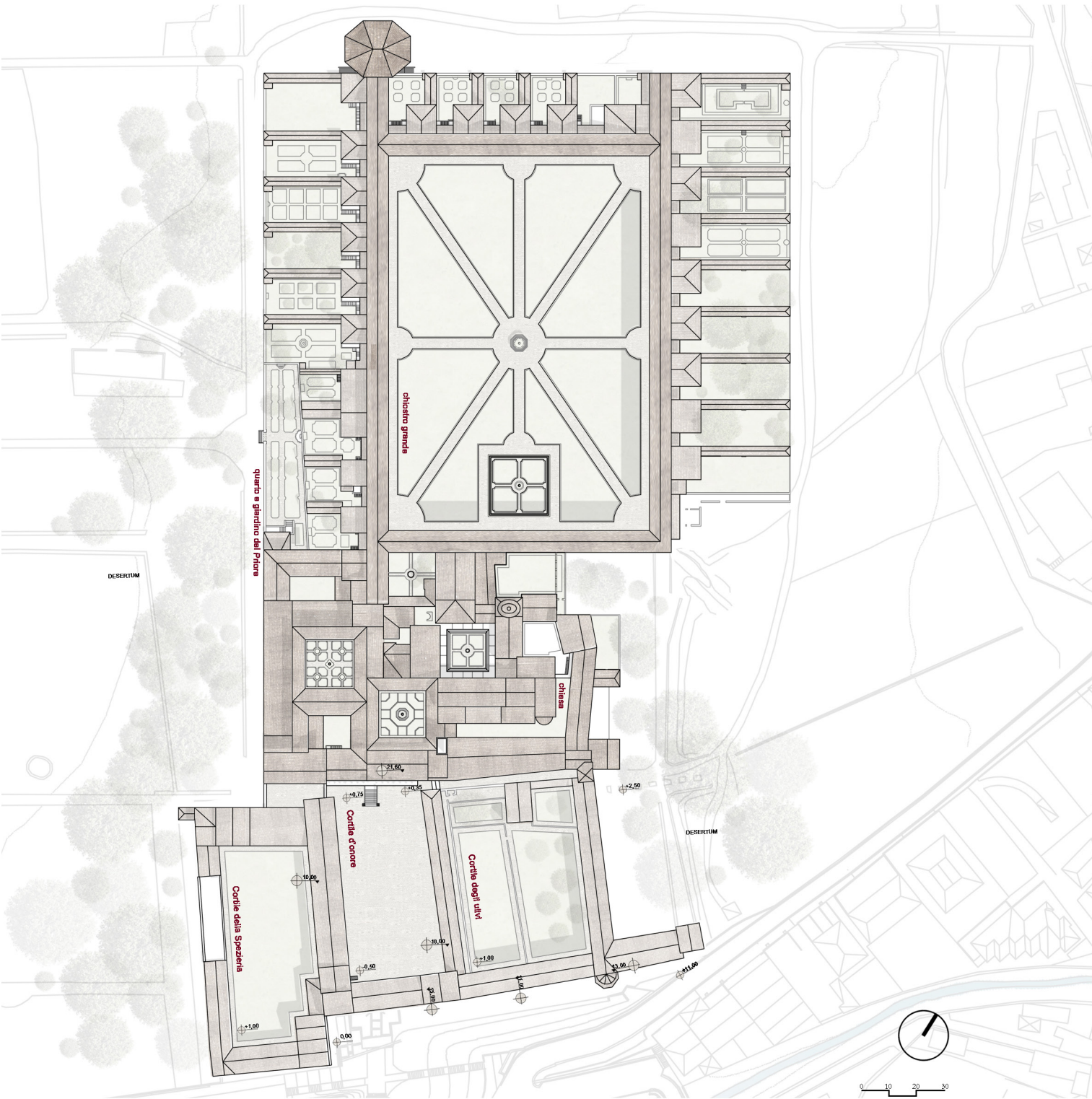


Fig. 8.3.9. Certosa di San Lorenzo, a Padula. A sinistra, la pianta delle coperture. A destra, la planimetria del primo livello.

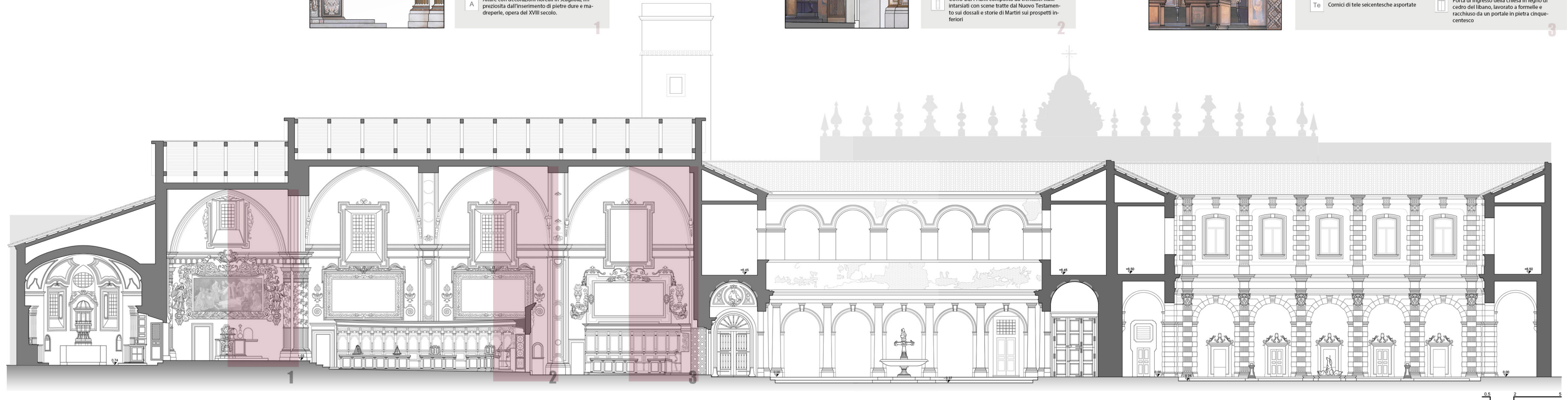
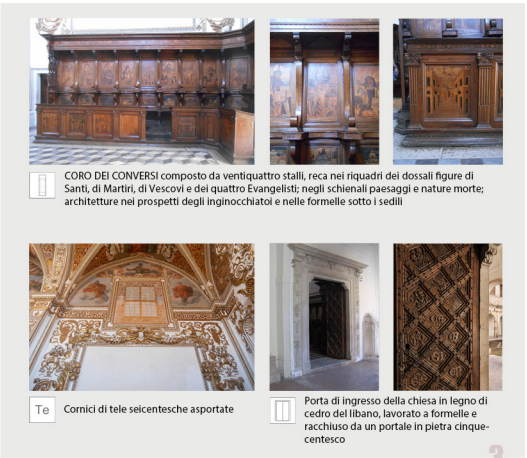
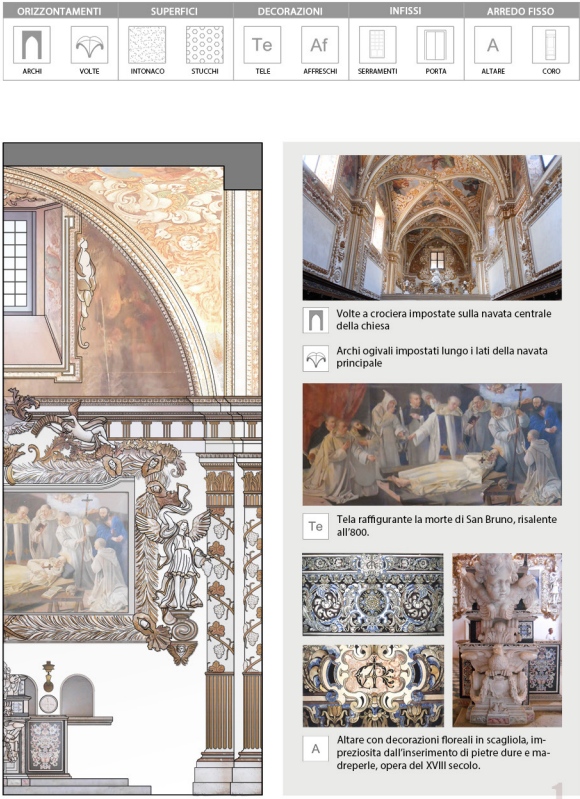
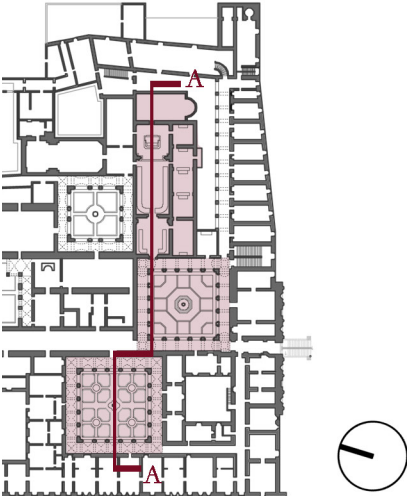


Fig. 8.4.0. Certosa di San Lorenzo, a Padula. Sezione longitudinale sulla chiesa monastica e chiostri minori con dettagli.

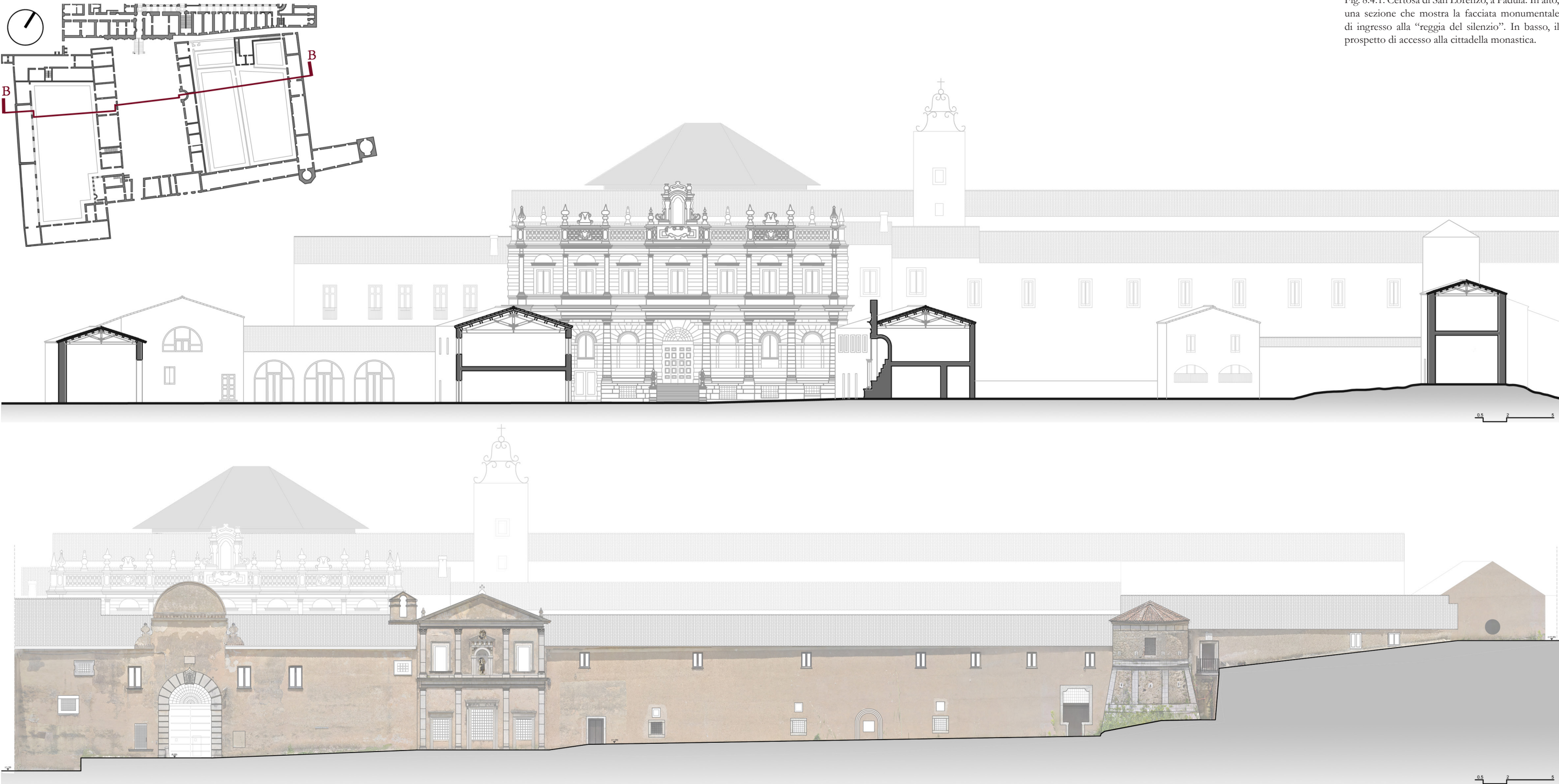


Fig. 8.4.1. Certosa di San Lorenzo, a Padula. In alto, una sezione che mostra la facciata monumentale di ingresso alla “reggia del silenzio”. In basso, il prospetto di accesso alla cittadella monastica.

Fig. 8.4.2. Certosa di San Lorenzo, a Padula. La facciata monumentale con studi di dettaglio.

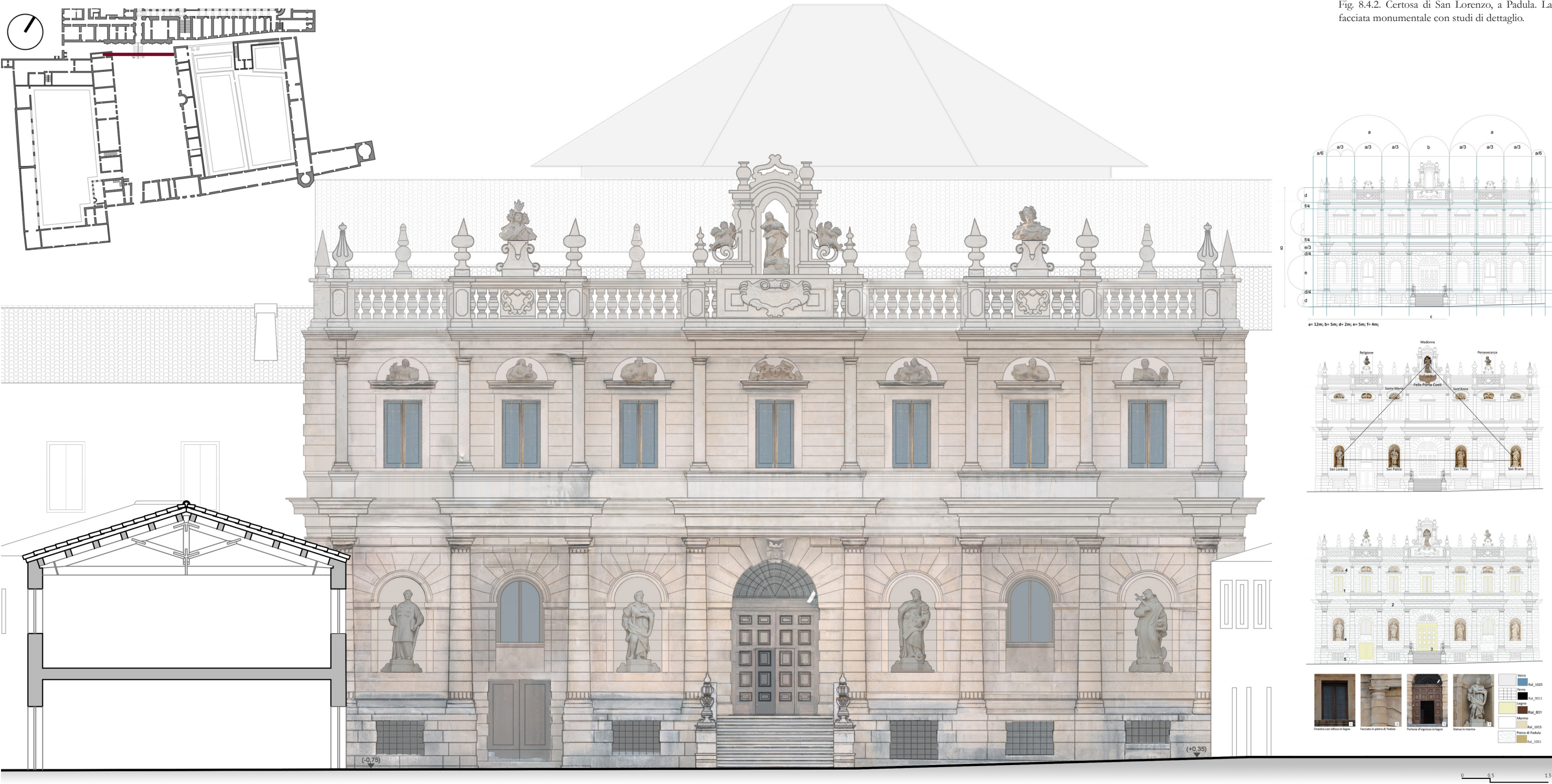
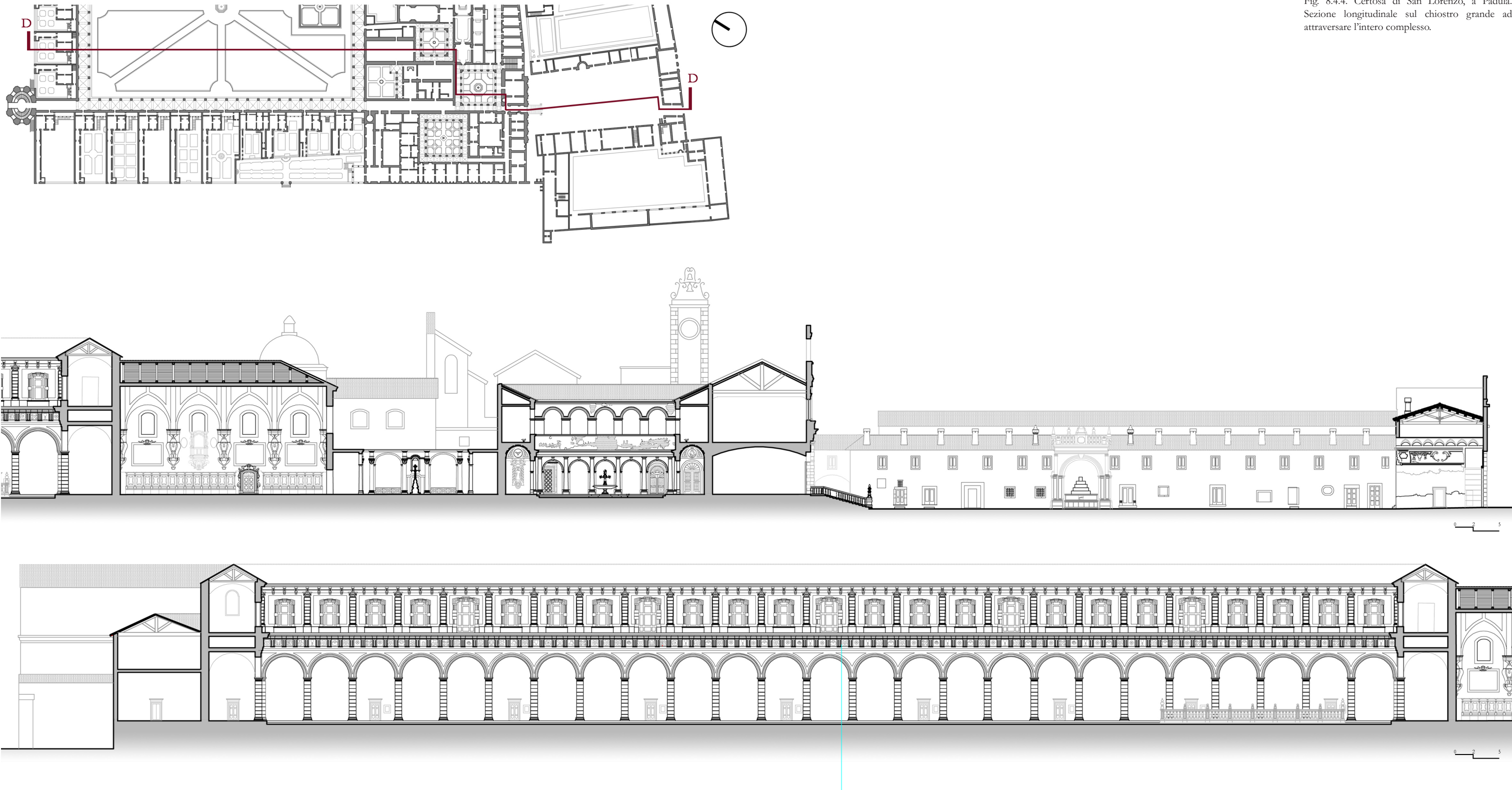


Fig. 8.4.3. Certosa di San Lorenzo, a Padula.
Sezione trasversale sulla chiesa monastica.



Fig. 8.4.4. Certosa di San Lorenzo, a Padula.
Sezione longitudinale sul chiostro grande ad attraversare l'intero complesso.



CAPITOLO NONO

Concettualizzazione del dominio di conoscenza.
Estensione del lessico per il dominio delle certose
tra diversità linguistica e specializzazione

La seconda fase della metodologia si interessa della organizzazione di tutto l'apparato documentario, raccolto nella fase precedente di rilevamento (cap. 8), per strutturare semanticamente il modello architettonico. L' operazione primaria consiste nell'identificare i concetti teorici in riferimento ai quali scomporre la morfologia dell'architettura. Annotare semanticamente un artefatto digitale vuol dire, difatti, associare concetti astratti alle componenti geometriche più rilevanti della mesh tridimensionale. I modelli di descrizione semantica richiedono, quindi, l'impiego di un vocabolario specifico, settorializzato e condiviso ovvero l'individuazione di concetti rappresentati in formati standard che siano riconoscibili internazionalmente. Il ricorso a tali vocabolari permette di risolvere l'ambiguità di annotazione.

9.1 L'ambiguità terminologica

Una annotazione può essere ambigua per motivazioni riconducibili a questioni lessicali, articolate su un duplice livello: da un lato, l'omonimia di termini che acquistano una significazione in relazione al particolare dominio di conoscenza; dall'altro, lo stesso lemma può indicare concetti differenti all'interno del medesimo campo di conoscenza. Un esempio della prima tipologia di ambiguità è il termine “luce”. Il vocabolo assume, infatti, un significato differente a seconda del campo di conoscenza al quale è riferito: se la concettualizzazione è esperita

nel dominio della Fisica, “luce” indica una radiazione elettromagnetica percepibile dall’occhio umano, la cui lunghezza d’onda è compresa tra 0.77 e 0.39 micron. Ben diverso è il senso che il lemma enuclea quando il settore di riferimento è quello dell’Arte in cui il collegamento è con un effetto luminoso ottenuto mediante apposite tecniche coloristiche. Ancora, il termine può essere un tecnicismo sia nel dominio dell’Architettura ed Edilizia che dell’Idraulica. Nel primo caso, la significazione è riconducibile alla dimensione di una apertura intesa sia come vano (finestra, porta, ...) che come distanza tra due piedritti (di un arco, di un ponte, di un portico, ...). Nella scienza idraulica, invece, la “luce” è una apertura che consente il passaggio di un fluido.

Ne consegue che, in prima battuta, per risolvere l’ambiguità sia necessaria l’adozione di un vocabolario di settore che consenta di circoscrivere il dominio di conoscenza in cui la concettualizzazione è impiegata.

L’ambiguità terminologica non si esaurisce, però, nella delimitazione del campo concettuale. Esistono, come anticipato, termini che hanno più significati all’interno del medesimo dominio di conoscenza. Una esemplificazione è il vocabolo “mensa” il quale, considerato esclusivamente nel settore dell’Architettura, può riferirsi, vicendevolmente, al piano marmoreo dell’altare, su cui il sacerdote compie i riti dell’Eucaristia, al locale in cui si preparano e consumano pasti, alla tavola a cui ci si siede per mangiare.

Appare ora evidente che il ricorso ad un vocabolario è la condizione necessaria per risolvere l’ambiguità resa sufficiente se il dizionario è esteso alla dimensione del tesoro (cap. 3).

L’uso di relazioni tesaurali risolve l’ambiguità dell’annotazione e consente ai dati arricchiti semanticamente di essere processabili da Intelligenze Artificiali laddove, quando un termine semantico è tratto da un tesoro

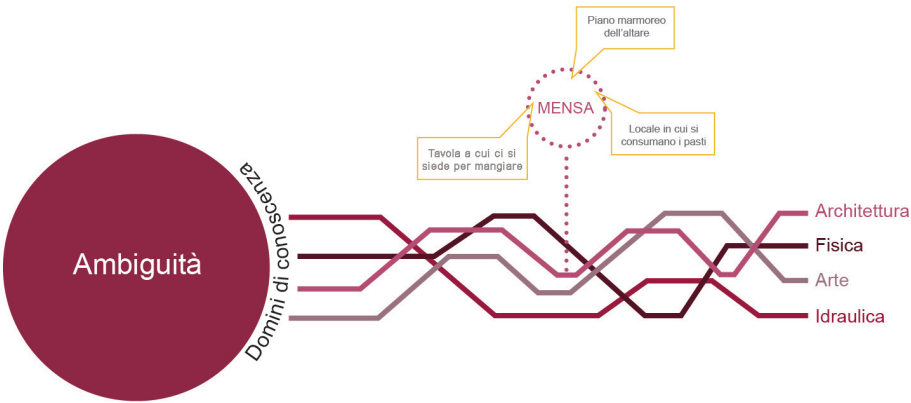


Fig. 9.1.1. Schematizzazione delle motivazioni di una annotazione ambigua.

di dominio controllato e associato ad una forma tridimensionale come etichetta, un significato più ricco e più esplicito viene attribuito all’annotazione, migliorando la sua interpretabilità.

Riproponendo l’esempio precedente, se un utente crea una etichetta comprendente il termine “mensa” e il lemma “mensa” è tratto da una ontologia che inquadra il concetto nel dominio architettonico e si combina ad un tesoro in cui il vocabolo è definito come sotto-parte dell’altare, l’annotazione sarà esplicita e univoca. Il termine “mensa” è riconosciuto in primo luogo nella sua significazione nel campo di conoscenza dell’Architettura, eludendo l’attribuzione di senso in diritto canonico. Inoltre, il concetto è identificato come una parte dell’oggetto architettonico “altare” piuttosto che una struttura o un locale in cui si preparano e consumano i pasti in determinate collettività.

Il ricorso a tesori per l’annotazione semantica, facilita al contempo il ragionamento sull’elemento annotato e permette alle risorse di diventare parte del più ampio Web Semantico. In particolare, l’annotazione di attributi di basso livello di componenti tridimensionali rende possibile l’inferenza semantica associando etichette di livello superiore. Ad esempio, nel dominio architettonico, è possibile usare regole che associano attributi specifici a un elemento geometrico, come un altare religioso, in funzione della sua classificazione. Se un elemento a sviluppo prevalentemente orizzontale è etichettato con un piano marmoreo denominato “mensa”, rivestito frontalmente con un “paliotto”, recante in sommità un “tabernacolo” e arricchito da un “polittico” si può dedurre con un alto livello di sicurezza che l’elemento annotato è un “altare” e specificamente un “altare maggiore”.

L’ inquadramento all’interno di regole tesaurali e vocabolari di dominio controllato del processo di strutturazione semantica delle informazioni, fornisce, in sintesi, una soluzione convincente all’ambiguità di annotazione che, ordinata secondo codici interpretabili e processabili da Intelligenze Artificiali, supporta il ragionamento di inferenza semantica.

È per questo motivo che nell’ambito della ricerca si è deciso di riferirsi ad un tesoro del dominio architettonico per la selezione dei concetti semantici in ossequio ai quali segmentare i dati spaziali e annotare il corpus informativo. Il tesoro prescelto è l’*Art and Architecture Thesaurus* del *Getty Research Institute* (par. 3.4). L’AAT è un vocabolario di dominio controllato contenente, ad oggi, più di 35000 termini generici per la Storia dell’Arte e dell’Architettura, strutturati in relazioni gerarchiche, associative e di equivalenza. Essendo un tesoro multilingue, formalizzato a livello internazionale, la scelta di utilizzarlo come riferimento permette di raffinare

la qualità dell’annotazione, implementando l’interoperabilità delle risorse e definendo un campo comune di ragionamento tra gli annotatori. Come si dirà nel paragrafo 9.3, l’internazionalizzazione del lessico è una operazione linguistica estremamente complessa in cui la ricchezza terminologica di un dominio di conoscenza, quale quello architettonico, si confronta con la molteplicità e varietà delle testimonianze costruite. La competenza di un esperto di dominio nel processo di traduzione assume un ruolo fondamentale per discernere le soluzioni terminologiche più idonee nell’articolato scenario della diversità linguistica.

9.2 Estensione del lessico per le certose campane

L’*Art and Architecture Thesaurus* costituisce una risorsa strutturata per l’individuazione dei concetti semantici e delle regole di scomposizione e aggregazione in unità coerenti delle rappresentazioni architettoniche digitali. Il tesaurus formalizza però sia concetti del dominio architettonico che dell’arte; inoltre, essendo una risorsa non esaustiva ma in continuo aggiornamento, non ricomprende necessariamente tutti i termini possibili per una specifica tipologia architettonica o un caso studio puntuale. Alla luce di queste considerazioni, è stato teorizzato un protocollo operativo di sistematizzazione del lessico proprio delle architetture esaminate nella ricerca. A partire dal contesto delle certose campane, è stato strutturato un elenco (chiaramente non ancora esaustivo) di concetti denotativi dell’architettura di indagine. Il lessico è stato poi specificato per il caso studio del monastero di Padula e ancor più dettagliato per un suo ambiente esemplificativo, la chiesa monastica.

La procedura di estensione del lessico per la tipologia architettonica certosina è stata condotta a partire dalla raccolta di un nutrito corpus bibliografico, prodotto negli anni sulle tre certose campane. Dalle fonti letterarie sono stati estratti i lemmi propri del dominio architettonico, costituenti un primo nucleo di concetti semantici pertinenti l’articolazione puntuale di un complesso certosino, certamente campano. Allo stesso tempo, l’estrazione dei concetti è stata effettuata analizzando direttamente la rappresentazione architettonica digitale, ampliando e raffinando il corpus semantico.

9.2.1 Raccolta e strutturazione del corpus bibliografico

Il lavoro di raccolta e strutturazione del corpus bibliografico prodotto

sulle tre certose campane è stato portato avanti dall’unità di Linguistica dell’Università di Salerno, coinvolta nel progetto PRIN CHROME¹. Un campione di testi scritti, consistente in 92 produzioni, è stato raccolto e classificato in sei tipologie testuali, distinte, in riferimento alla struttura sintattica, alla specializzazione del lessico e alla profilazione del destinatario, in:

- saggi scientifici (n. 20);
- cataloghi specialistici (n. 3);
- cataloghi divulgativi (n. 5);
- guide specialistiche (n. 12);
- schede e voci certificate online (n. 48);
- kit illustrativi (n. 4).

La tabella 9.10 mostra la suddivisione delle tipologie testuali in relazione alla certosa campana di cui trattano.

9.2.2 Estrazione terminologica dalle fonti scritte

Per ciascuna tipologia, una analisi quantitativa è stata svolta dai linguisti sia per i lemmi di uso più comune, appartenenti al Nuovo Vocabolario di Base NVdB, che per i tecnicismi. Il riferimento per lo studio lessicale è il Grande Dizionario Italiano dell’uso, il GRADIT, curato da Tullio De Mauro. In aderenza al GRADIT, sono stati estratti i lemmi con le marche d’uso:

- FO;
- AU;
- AD;
- TS.

La prima sigla, FO sta per “Fondamentale” ed indica, tra i lemmi principali, i vocaboli di altissima frequenza, le cui occorrenze costituiscono circa il 90% delle occorrenze lessicali nell’insieme di tutti i testi scritti o discorsi parlati. Con AU, “Alto Uso”, sono marcati i vocaboli di alta frequenza, le cui occorrenze costituiscono un altro 6% circa delle occorrenze lessicali nell’insieme di tutti i testi scritti o discorsi parlati. La sigla AD, “Alta Disponibilità” connota i vocaboli, relativamente rari nel parlare o scrivere, ma tutti ben noti perché legati ad atti e oggetti di grande

rilevanza nella vita quotidiana (alluce, batuffolo, carrozzeria, dogana, ecc.). Quest’ultimo è il gruppo più esposto al variare della cultura materiale e richiede aggiornamenti relativamente frequenti I vocaboli fondamentali, di alto uso e di alta disponibilità costituiscono nell’insieme il “vocabolario di base”. A questi di aggiungono altre marche d’uso tra le quali è stata considerata quella dei tecnicismi. La marca TS, “Tecnico-Specialistico”, identifica i vocaboli legati a un uso marcatamente o esclusivamente tecnico o scientifico e noti soprattutto in rapporto a particolari attività, tecnologie, scienze. È seguita da sottomarche

Tipologia testi	1. Certosa di San Martino	2. Certosa di San Giacomo	3. Certosa di San Lorenzo
I Saggio scientifico	<p>a. Stefano Piergidi, <i>Il programma iconografico del coro della Certosa di San Martino: dal Cavalier d'Arpino a Massimo Stanzione</i> in “Napoli nobilissima”, Settima serie, volume 1, fascicolo 1 (gennaio-aprile 2015), pp. 18-26.</p> <p>b. John Nicholas Napoli, <i>Più facile a indulgere nel capriccio? Costino Furengo e la causa 'ad exherentiam' alla Certosa di San Martino</i>, in “Napoli nobilissima”, 5.Ser. 4.2003, 5/6, pp. 209-218.</p> <p>c. Livio Pestilli, <i>Paolo de Matteis e Domenico Antonio Vaccaro nella cappella di S. Giuseppe alla Certosa di S. Martino</i>, in “Storia dell’arte”, 80.1994, 74-104.</p> <p>d. Stefano De Mieri, <i>Lorenzo Duca, Tesodoro de Voghel e le borse degli armali della Certosa di San Martino a Napoli</i>, in “Prospettiva”, 139/140.2010(2012), 151-166.</p> <p>e. Daniela Del Pesco, <i>Alla ricerca di Giovanni Antonio Dosio: gli anni napoletani (1590 - 1610)</i>, in “Bollettino d’arte”, 6.Ser. 77.1992, 71, 15-66.</p> <p>f. Maria Ida Catalano, Dosio, gli scultori, i marmorari e l’architetture di decorazione nella Certosa di San Martino a Napoli, in <i>Giovane Antonio Dosio da San Gimignano architetto e scultore fiorentino tra Roma, Firenze e Napoli</i>, 2011, pp. 661-699.</p> <p>g. Raffaele Causa, <i>L’Arte nella Certosa di San Martino a Napoli</i>, Ed. Di Mauro, 1973.</p> <p>h. Franco Strazullo, <i>La quadreria del Quarto del Priore nella Certosa di San Martino a Napoli</i>, Pubblicazione Napoli, Giannini, 1983.</p> <p>i. Raffaele Tufari, La certosa di S. Martino in “Napoli”, Napoli : tip. G. Ruscacci, 1850.</p>	<p>a. Roberto Di Stefano, <i>La Certosa di San Giacomo a Capri</i>, Napoli : Edizioni scientifiche italiane, 1982.</p> <p>b. Eugenio Aprea, <i>Capri : la certosa di S. Giacomo dalla sua fondazione ad oggi</i> (1371) / Eugenio Aprea Pubblicazione S.l. : s.n.l., stampa 1969 (Napoli : Tip. Pelosi).</p> <p>c. Antonio Sacco, <i>La certosa di Padula (disegnata, descritta e narrata su documenti inediti dal prof. Antonio Sacco, con speciale riguardo alla topografia, alla storia e all’arte della contrada</i>. Roma : Tip. della Unione editrice : poi Grafia Industrie grafiche, volume I e volume III. 1914-1930.aa</p> <p>d. Armando Schiavo, <i>Opere architettoniche nella Certosa di Padula</i>, 1941.</p> <p>e. Federico Amabile, <i>La Certosa di Padula</i>, Tip. Santos Cantelmi Salerno, 1964.</p> <p>f. La Certosa Sotterranea Padula, Certosa di San Lorenzo - 10 agosto-10 ottobre 1992 Pubblicazione Napoli : Fausto Fiorentino, stampa 1992.</p> <p>g. La Certosa di San Lorenzo a Padula , Electa Napoli.</p> <p>h. Mario Casella, <i>La Certosa di Padula in età contemporanea (1866-1960)</i>, Laveglia Editori, Battipaglia, 2007.</p> <p>i. Domenico Pica, <i>La Certosa di Padula nella storia e nell’arte</i>, Salerno , 1969.</p> <p>j. Concetta Restaino, <i>Le tuniche lignee della Certosa di Padula Ragporti tra immagini e testi nel coro dei padri</i>*, 2010.</p>	<p>a. Giovanni Vitolo, <i>Aspetti e problemi della storia delle certose nel Mezzogiorno medievale: gli esempi di Napoli e Padula</i>, in “Napoli nobilissima”, 5.Ser. 2.2001, 1/4, 5-14.</p> <p>b. Antonio Sacco, <i>La certosa di Padula (disegnata, descritta e narrata su documenti inediti dal prof. Antonio Sacco, con speciale riguardo alla topografia, alla storia e all’arte della contrada</i>. Roma : Tip. della Unione editrice : poi Grafia Industrie grafiche, volume I e volume III. 1914-1930.aa</p> <p>c. Armando Schiavo, <i>Opere architettoniche nella Certosa di Padula</i>, 1941.</p> <p>d. Federico Amabile, <i>La Certosa di Padula</i>, Tip. Santos Cantelmi Salerno, 1964.</p> <p>e. Luigi Pica, <i>Padula e la sua Certosa</i>, Edizioni Cantelmi, Salerno, 1971.</p> <p>f. Carlo Pesce, <i>Il Vallo di Diano e la Certosa di Padula</i>, Carlo Pesce Editore ., 2. ed Pubblicazione Lagonegro : tip. Lucana di F. Aiello, 1916.</p> <p>g. Mario de Cuzzo e Viga de Marini, <i>La Certosa di Padula</i>, Soprintendenza per i Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici di Salerno e Avellino, 2006.</p> <p>h. Piera Carlomagno, <i>Padula, Il Complesso Monumentale della Certosa</i>, in “La Provincia di Salerno”, Edizioni dell’Ippogrifo.</p> <p>i. La certosa di Padula: guida alla visita: schede informative: Padula: Comune di Padula , 19.</p> <p>j. Giuseppe Lapadula, <i>La Certosa di San Lorenzo</i> (Matonti Editore).</p> <p>k. Certosa di San Lorenzo Padula guida breve 2006. Ministero per i Beni e le Attività Culturali Direzione Generale per la Valorizzazione del Patrimonio Culturale Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici di Salerno e Avellino: Ed. Gennaro Miccio e Eufemia Anna Baratta</p> <p>l. Settimana della cultura 16-25 aprile 2010 , Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Campania Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici Salerno e Avellino.</p> <p>m. Fortunato Teobaldo, <i>La Certosa di San Lorenzo</i> , in “Campania Felix speciale Provincia di Salerno”, Altrastamp Edizioni, 2005.</p>
II Catalogo specialistico	<p>a. <i>San Martino immagini e memorie</i> a cura di Nicola Spinosa scritti di Adele Pezzullo, Rossana Muzii, Umberto Bile con fotografie di Sergio Riccio (da p. 23).</p>	<p>a. <i>Appunti per una visita : la Certosa di San Giacomo a Capri</i> Pubblicazione Capri : Edizioni la Conchiglia, 2008</p>	<p>a. Elia Giudice, <i>La Certosa di San Lorenzo di Padula</i> , Laveglia, Salerno, 2002.</p>
III Catalogo specialistico	<p>a. <i>La Certosa e il Museo di San Martino</i> , Editrice Electa, pp. 11,14,15,21,22,23,26,28,30,35,38,79,84.</p>	<p>a. <i>I giardini della Certosa. Un progetto di Paolo Pejrone per Capri</i>. Catalogo della mostra a cura di Rossana Muzii, Arte’m, 2011.</p>	
IV Guida specialistica	<p>a. Programma Operativo Interregionale, “Attrattori culturali, naturali e turismo”, Complesso Monumentale museo e certosa di San Martino, Castel Sant’Elmo. Opere di riqualificazione e valorizzazione funzionale.</p> <p>b. D. Monaca, <i>Guida della Certosa di San Martino</i> / , Napoli, Lanciano e Pinto, 190.</p> <p>c. G. Doria, <i>Il Museo e la Certosa di San Martino</i> - Napoli, Di Mauro editore, Cava de Tirreni, Napoli, 1964.</p> <p>d. <i>La Certosa di San Martino</i> , Guide Artistiche, Electa Napoli.</p> <p>e. <i>Napoli tra le mani. L’arte napoletana attraverso percorsi fruibili. Itinerari tattili-narrativi attenti anche alle esigenze delle persone con disabilità</i>, p.53-63.</p> <p>f. Elio De Rosa, 1980-1990 <i>I Restauri delle cappelle della Certosa di San Martino</i> , Napoli, 1990.</p>	<p>a. Aniello Langella e Giuseppina Caporaso <i>Capri: La Certosa di San Giacomo</i> , pp. 9-13.</p> <p>b. Museo Certosa di San Giacomo-Complesso monumentale di Capri , Carta della qualità dei servizi</p>	<p>a. Piera Carlomagno, <i>Padula, Il Complesso Monumentale della Certosa</i>, in “La Provincia di Salerno”, Edizioni dell’Ippogrifo.</p> <p>b. La certosa di Padula: guida alla visita: schede informative: Padula: Comune di Padula , 19.</p> <p>c. Giuseppe Lapadula, <i>La Certosa di San Lorenzo</i> (Matonti Editore).</p> <p>d. Certosa di San Lorenzo Padula guida breve 2006. Ministero per i Beni e le Attività Culturali Direzione Generale per la Valorizzazione del Patrimonio Culturale Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici di Salerno e Avellino: Ed. Gennaro Miccio e Eufemia Anna Baratta</p> <p>e. Settimana della cultura 16-25 aprile 2010 , Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Campania Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologici Salerno e Avellino.</p> <p>f. Fortunato Teobaldo, <i>La Certosa di San Lorenzo</i> , in “Campania Felix speciale Provincia di Salerno”, Altrastamp Edizioni, 2005.</p>

Tab. 9.10. Suddivisione delle tipologie testuali in relazione alla certosa campana di cui trattano.

V Schede e voci certificate (on-line)	<p>a. https://it.wikipedia.org/wiki/Certosa_di_San_Martino</p> <p>b. https://it.wikipedia.org/wiki/Chiostridi_San_Martino</p> <p>c. http://www.touringclub.it/destinazione/170525/certosa-di-s-martino</p> <p>d. http://www.touringclub.it/evento/padula-certosa-e-museo-di-martino-con-sotterranei</p> <p>e. <i>Campania, Napoli, Caserta, Benevento, Ischia, Pompei, la Costiera, il Vesuvio, il Cilento, Capri</i>, Touring Club Italiano, Touring Editore, 2011</p> <p>f. http://www.polomusealecampania.beniculturali.it/index.php/la-certosa-sangiacomo</p> <p>g. http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MIBAC/sito-MIBAC/Luogo/MibacInfo/Luoghi-della-Cultura/visualizza_asset.html?id=152363&pagename=157031</p> <p>h. http://www.cir.campania.beniculturali.it/luoghi-della-cultura/certosa-e-museo-di-san-martino/certosa-e-museo-di-san-martino/scheda_view</p> <p>i. http://www.itmap.it/napoli/certosa-di-san-martino/</p> <p>j. http://www.penisola.it/napoli/certosa-sanmartino.php</p> <p>k. http://www.napolografia.it/monumenti/chiese/maggiori/certosa/certosa02.htm</p> <p>l. Amangelo Sacco, <i>La Certosa di San Martino</i> in Guida Parco, Amangelo Sacco editore, Polla, 2005.</p> <p>m. Elisabetta Vaino, <i>La Certosa di San Martino “Monumento Nazionale” per il suo patrimonio artistico e architettonico</i>, I’M Arte novembre -dicembre 2012.</p> <p>n. <i>Certosa di San Martino</i>, Guide turistiche Campania.</p> <p>o. Palumbo Agnese, <i>Il giro di Napoli in 501 luoghi</i>, Ponticello Maurizio.</p> <p>p. Napoli: <i>Certosa e Museo di S. Martino con i Sotterranei</i>, Touringclub.</p> <p>q. <i>Certosa e Museo di San Martino</i>, in L’arte in Campania, Campania Artcard, p. 78.</p> <p>r. http://www.dunpiz.net/napoli/monumenti/Certosa.htm.</p> <p>s. Roberto Bosi, <i>Monasteri italiani, guida turistica</i>, Edizioni Calderini s.r.l., 1992.</p>	<p>a. <i>Campania, Napoli, Caserta, Benevento, Ischia, Pompei, la Costiera, il Vesuvio, il Cilento, Capri</i>, Touring Club Italiano, Touring Editore, 2011</p> <p>b. http://www.polomusealecampania.beniculturali.it/index.php/la-certosa-sangiacomo</p> <p>c. <i>Un itinerario nella natura e nella storia</i>, Culturalia, pp. 1-41.</p> <p>d. <i>Campania, Napoli, Caserta, Benevento, Ischia, Pompei, la Costiera, il Vesuvio, il Cilento, Capri</i>, Touring Club Italiano, Touring Editore, 2011</p> <p>e. http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MIBAC/sito-MIBAC/Luogo/MibacInfo/Luoghi-della-Cultura/visualizza_asset.html?id=152363&pagename=157031</p> <p>f. http://www.puntostabianews.it/in-evidenza/item/19873-chiesa-e-certosa-di-san-giacomo.html</p> <p>g. http://www.fotooweb.it/sorrentina/Capri%20Certosa%20d%20San_Giacomo.htm</p> <p>h. Le isole del golfo, Capri.</p> <p>i. http://www.ioviaggio.it/certosa-di-san-giacomo-capri.</p> <p>j. Welcome to Capri best. It, p.23.</p> <p>k. <i>Certosa di San Giacomo Capri</i>, Art bonus.</p> <p>l. <i>Certosa di San Giacomo-Capri</i>, Irisiblog.it.</p> <p>m. <i>La Magnifica Certosa di San Giacomo a Capri: nata da un voto religioso</i>, Vesuvio live.it.</p> <p>n. Anna Roda, Don Gabriele Mangiarotti, <i>La Certosa di San Giacomo a Capri</i>, Culturalcatolica.it.</p> <p>o. <i>Capri, Certosa di San Giacomo</i>, Cartusia lover.</p> <p>p. Capri è -A Place of Dream.</p>	<p>a. https://it.wikipedia.org/wiki/Certosa_di_Padula</p> <p>b. http://www.touringclub.it/evento/padula-sa-la-certosa-di-san-lorenzo-e-il-battistero-di-s-giovanni</p> <p>c. <i>Un itinerario nella natura e nella storia</i>, Culturalia, pp. 1-41.</p> <p>d. <i>Campania, Napoli, Caserta, Benevento, Ischia, Pompei, la Costiera, il Vesuvio, il Cilento, Capri</i>, Touring Club Italiano, Touring Editore, 2011</p> <p>e. http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MIBAC/sito-MIBAC/Luogo/MibacInfo/Luoghi-della-Cultura/visualizza_asset.html?id=152363&pagename=157031</p> <p>f. http://ambientesa.beniculturali.it/BAP/?q=luoghi&luogo=Monumenti&provincia=8&comune=&ort=san%20lorenzok&id=43</p> <p>g. http://www.valloweb.com/certosa/</p> <p>h. http://www.culturalitalia.it/opencms/museed/viewitem.jsp?an=nasce&case=&id=cap%3Aculturalitalia_n%3Amuseeditalia_mus_469</p> <p>i. Amangelo Sacco <i>La Certosa di San Lorenzo</i>, in Guida Parco, Amangelo Sacco Editore, Polla, 2005.</p> <p>j. <i>Certosa San Lorenzo</i>, L’arte in Campania , Campania Artcard, p.75.</p> <p>k. http://www.polomusealecampania.beniculturali.it/index.php/la-certosa-padula</p> <p>l. <i>Itinerari Cilento</i>, Touring Club Italiano, Touring Editore, 2005</p> <p>m. Roberto Bosi, <i>Monasteri italiani, guida turistica</i>, Edizioni Calderini s.r.l., 1992</p> <p>n. <i>La Magnifica Certosa di San Giacomo a Capri: nata da un voto religioso</i>, Vesuvio live.it.</p> <p>o. Anna Roda, Don Gabriele Mangiarotti, <i>La Certosa di San Giacomo a Capri</i>, Culturalcatolica.it.</p> <p>p. <i>Capri, Certosa di San Giacomo</i>, Cartusia lover.</p> <p>q. Capri è -A Place of Dream.</p>
VI Kit illustrativi	<p>a. http://www.dunpiz.net/napoli/monumenti/Certosa.htm</p>	<p>a. http://www.capri.it/it/la-certosa-di-san-giacomo-2</p>	<p>a. http://www.3vesalerno.com/la-certosa-di-padula</p> <p>b. <i>Arte nelle certose dell’Italia meridionale celebrazioni per il VII centenario Certosa di San Lorenzo Padula</i>, Soprintendente Arch. Giuseppe Zampino: Paparo Edizioni, Napoli.</p>

ovvero dalla specificazione, in genere abbreviata, dell’ambito specialistico al quale si riferisce (es. med., mus., arch., arte, ecc.).

La prima osservazione generale scaturita dalla estrazione dei lemmi interessa la distribuzione dei NVdB (FO, AU e AD) rispetto ai TS. Come è facile immaginare, nella totalità del corpus raccolto, circa l’80% dei vocaboli è marcato come un vocabolo di base e soltanto il 20% costituisce un tecnicismo. La distribuzione, però, varia per le guide specialistiche nelle quali l’uso dei TS raggiunge il 50% (Figura 9.1.2).

Nella volontà di organizzare una prima sistematizzazione del lessico specifico per l’architettura delle certose campane, l’attenzione è stata concentrata sui tecnicismi. Per ogni tipologia testuale sono state analizzate le sottomarche dei TS (Fig. 9.1.3). La percentuale preponderante è riservata ai tecnicismi dell’architettura, cui seguono quelli della religione, dell’arte, ecclesiastici, dell’edilizia, della tecnica. Anche altre sottomarche sono state

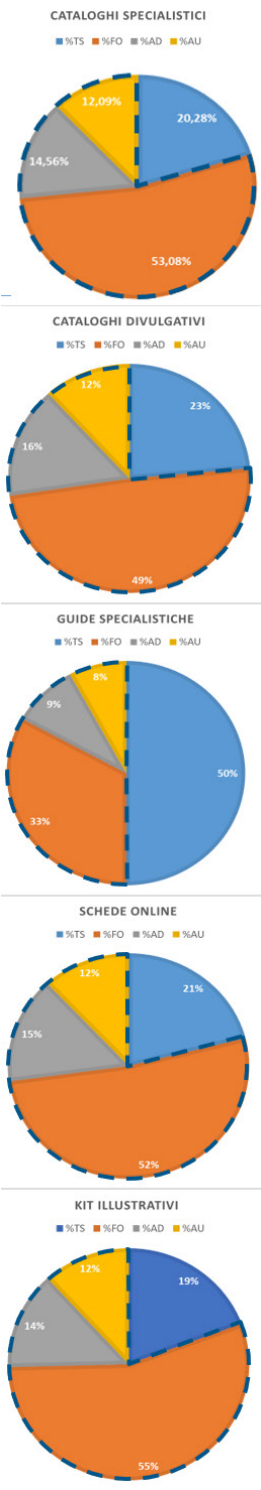


Fig. 9.1.2. Distribuzione dei NvdB rispetto ai TS per le differenti tipologie testuali.

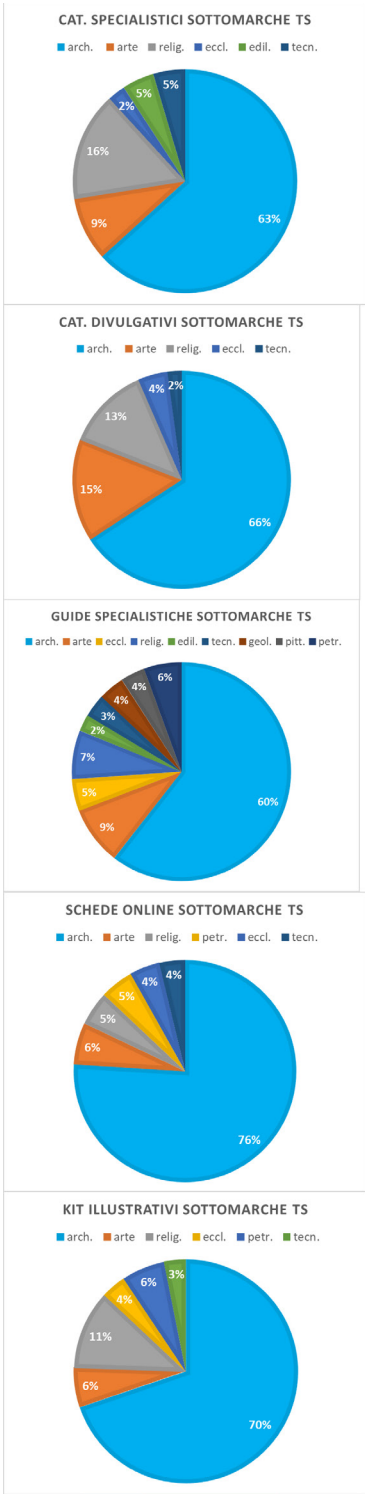


Fig. 9.1.3. Distribuzione delle sottomarche di TS per le differenti tipologie testuali.

estratte ma con una percentuale di occorrenza inferiore all’1% (diritto canonico, storia della religione, storia dell’arte, archeologia, petrografia, mineralogia, geometria, pittura).

Il lavoro dei linguisti ha condotto alla composizione di un primo elenco di concetti distinti, per tutto il corpus scritto sulle tre certose campane, in 314 tecnicismi di architettura (TS arch.), 111 tecnicismi d’arte (TS arte) e 16 tecnicismi di petrografia (TS petr.). Selezionati e ritenuti significativi per l’estensione del lessico poiché tutti rientrati in una definizione architettonica generale della tipologia certosina.

A partire da tale elenco, l’analisi è stata dettagliata per la certosa di Padula. Lo studio linguistico è stato utilizzato come base per una successiva analisi, interna al dominio di competenza dell’architetto, condotta sui medesimi testi scritti, aventi però ad oggetto il solo cenobio di San Lorenzo. Dalla produzione letteraria, sono stati estratti con il punto di vista dell’esperto di dominio, tutti i lemmi ricompresi nel campo dell’architettura. Architettura intesa nella sua accezione più ampia, includente matrici geometriche e regole tecniche di costruzione. L’estrazione ha portato alla formulazione di un elenco comprendente, per la sola Padula, 759 concetti. Per ciascuno di essi è stata segnalata sia la marca d’uso indicata dal GRADIT che validata la inclusione in un lessico specialistico d’architettura, verificandone la presenza in riconosciuti e affermati dizionari di settore².

Il lavoro dell’esperto di dominio - con la codificazione di 759 lemmi per una sola certosa, a paragone dei 441 totali estratti complessivamente per le tre certose campane dai linguisti - mostra la necessità di avvalersi di una competenza specialistica nell’opera di definizione linguistica di un determinato campo di conoscenza.

9.2.3 Estrazione terminologica dalla rappresentazione digitale

La sistematizzazione dei concetti semantici propri di una qualsiasi tipologia architettonica, non esclusivamente per una certosa, non può esaurirsi con l’estrazione terminologica dalla sola produzione letteraria scritta. Il corpus bibliografico non potrà mai considerarsi esaustivo laddove la stesura di testi non riesce ad annoverare la totalità di elementi architettonici e quindi corrispondenti concetti che danno forma ad una architettura. L’estensione lessicale per un determinato tipo architettonico potrà considerarsi più completa se svolta anche attraverso l’analisi e interrogazione diretta del modello reale, dal vero o digitalizzato. L’operazione è, tuttavia,

estremamente lunga e onerosa pertanto, ai fini della ricerca, si è deciso di dettagliare il corpus semantico della certosa di San Lorenzo, estraendo termini dallo studio puntuale di un solo suo ambiente significativo, la chiesa monastica.

Attraverso l’analisi della rappresentazione architettonica digitale della chiesa di Padula, sono stati codificati altri 50 lemmi circa.

9.3 Internazionalizzazione del lessico

Lo scopo della strutturazione di un lessico specifico per il tipo del monastero certosino campano e, ancor più, per l’esempio del Vallo di Diano risiede nell’intento di ricondurre l’estensione lessicale al tesoro internazionale, selezionato all’inizio della ricerca come riferimento principale per la scomposizione semantica delle risorse documentarie e spaziali.

L’AAT, in quanto dizionario multilingue, comprende circa 3000 lemmi in lingua italiana. La maggior parte delle risorse sono registrate in inglese. Pertanto, in prima battuta si è verificata la presenza nel tesoro del Getty dei concetti semantici estratti. Dei circa 809 vocaboli considerati, solo 99 figurano in AAT nella loro forma italiana. Per tutti gli altri si è resa necessaria un’operazione di traduzione dall’italiano all’inglese per capire tra questi quali siano effettivamente registrati nel Getty e quali risultano completamente assenti, in qualsiasi declinazione linguistica.

La traduzione dei lemmi ha richiesto ancora una volta la competenza specialistica dell’esperto di dominio architettonico da affiancare al lavoro del linguista. La semplice traduzione dalla forma italiana a quella inglese, seppure studiata con l’ausilio di dizionari specifici³, non è sufficiente a garantire l’esattezza dell’operazione. Molti termini e polirematiche⁴ necessitano di un attento studio sia del contesto scritto in cui sono adoperati sia dell’architettura reale cui si riferiscono.

Alcuni esempi chiarificatori sono il vocabolo “baccellatura” e la polirematica “arco maggiore”.

Nel primo caso, il linguista ha selezionato la traduzione “*potted*” facendo riferimento al motivo decorativo dei baccelli, proprio più della scultura ornamentale che non della plasticità architettonica. L’esame comparato del testo e dell’elemento architettonico cui la descrizione è legata, ha permesso di individuare la traduzione più corretta in “*fluting*” con il significato di “scanalature parallele ravvicinate, utilizzate per ornare colonne e pilastri”, più aderente al caso specifico delle colonne poste a scandire il ritmo della navata della chiesa.

Analogamente, la polirematica “arco maggiore” non può essere declinata

come “*main arch*” poiché il riscontro tra testo scritto e modello architettonico rivela l’uso del costruito lessicale per indicare l’arco posto nella chiesa monastica a separazione tra il coro e l’abside, per il quale la traduzione più idonea è “*chancel arch*”. Del resto, anche nella lingua italiana, nel campo dell’architettura, l’espressione “arco maggiore” è impiegata per connotare elementi architettonici in cui la dimensione geometrica di ‘grandezza’ non è esaustiva della significazione attribuita alla polirematica.

La ricchezza terminologia del dominio architettonico richiede, in conclusione, una attenzione e competenza distintiva per il processo di internazionalizzazione del lessico. La traduzione è una operazione linguistica estremamente complessa in cui l’esperto di dominio ed il linguista devono cooperare per vagliare la soluzione terminologica più adatta e rispondente alla specificità del costruito. L’analisi accurata della rappresentazione architettonica assume un ruolo chiave e imprescindibile per la coerenza del processo traduttivo, chiamato a confrontarsi, nella dialettica molteplicità-intellegibilità, con le singoli esemplificazioni di concetti più generali.

Note

1 L’unità di ricerca, afferente al Dipartimento di Studi Umanistici, ricomprende il Laboratorio di Linguistica Applicata Lab. L.A. in collaborazione con il Laboratorio di Lessico e grammatica dell’italiano LeGIT dell’Università di Salerno. Il gruppo è guidato dalla prof.ssa Renata Savy e dal prof. Sergio Lubello, coordinatori del lavoro svolto dalla prof.ssa Grazia Basile con le dott.ssa Iolanda Alfano, Violetta Cataldo, Sara Senigalliesi e Annamaria Sparano.

2 Tra questi si cita il Dizionario di Architettura di Nikolaus Pevsner, John Fleming e Hugh Honour del 2005, il Dizionario Enciclopedico di Architettura e Urbanistica DAU di Paolo Portoghesi del 1968, il Dizionario di architettura di Giacomo Ravizzani del 1982.

3 Tra questi si cita l’Inglese per l’architettura di Paolo Bulletti del 2015, English for Architecture di Cristina Cawthra del 2004, il Dizionario tecnico dell’edilizia e dell’architettura di P. Francesco Balboni del 2005.

4 Il termine designa un gruppo di parole che ha un significato unitario , non desumibile da quello delle parole che lo compongono.

CAPITOLO DECIMO

Un nuovo approccio di caratterizzazione semantica e
codificazione dell’incertezza di annotazione.
Teorizzazione e sperimentazione del metodo

Selezionato il tesaurus per il dominio architettonico ed estratti i concetti pertinenti la tipologia architettonica della certosa di San Lorenzo e della sua chiesa monastica, il protocollo di annotazione teorizzato si è concentrato sulla modalità di scomposizione della morfologia del manufatto in elementi e sotto-elementi, per isolare le parti della forma e associarle ai concetti corrispondenti, secondo il vocabolario individuato.

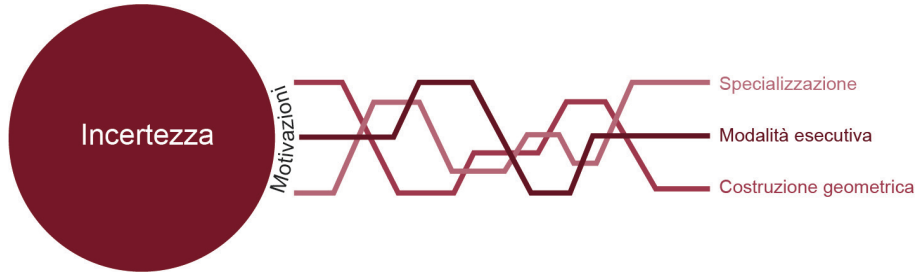
Il metodo si basa sulla scelta, come supporto per la strutturazione semantica dei dati spaziali, del modello digitale stesso, sotto forma di maglia poligonale. L’impiego della rappresentazione poliedrica consente, a differenza dei sistemi oggi più utilizzati, come le nuvole di punti o le fotografie (par. 5.2), caro supporto di etichettatura per archeologi e restauratori, di discernere la topologia dei singoli componenti architettonici con maggior facilità, grazie alle possibilità offerte dalla *Computer Vision* di interrogare mappe delle normali, del colore, dell’occlusione ambientale.

In aggiunta, il sistema teorizzato tiene in considerazione che oltre ad essere ambigua (cap. 9), l’annotazione può essere incerta.

L’incertezza di etichettatura è dovuta alla difficoltà degli annotatori, esperti di dominio, ad indicare il confine geometrico di un concetto semantico ed è riconducibile a molteplici fattori: la specializzazione dell’etichettatore, la modalità esecutiva, aspetti morfologici e geometrici.

Nella prospettiva di fornire uno strumento capace, non di risolvere l’incertezza, radicata nella natura dell’essere architettura, ma di registrare e codificare l’incertezza, il modello formalizzato impiega mappe semantiche.

Fig. 10.1.1. Schematizzazione delle motivazioni di una annotazione incerta.



10.1 Codificazione del sistema di strutturazione ed etichettatura di semantica

Dal punto di vista operativo, la metodologia di annotazione teorizzata consiste nell’uso di mappe che descrivono concetti semantici applicati al modello tridimensionale come una texture.

Le mappe sono state generate impiegando un applicativo commerciale Substance Painter¹ dell’Allegorithmic, strumento di *texturing* professionale, sfruttato nelle sue possibilità operative, per associare informazioni semantiche alle rappresentazioni digitali.

Il principio di annotazione si basa sulla evidenziazione dei poligoni rilevanti per un determinato concetto, registrata su una mappa semantica. La mappa è ottenuta, in prima battuta, evidenziando con un colore i poligoni rilevanti attraverso un’azione di “pittura” condotta direttamente sul modello e/o sul suo sviluppo sul piano immagine UV. Le due rappresentazioni sono collegate tra loro per cui l’evidenziazione fatta sull’una si trasferisce in automatico sull’altra. I poligoni possono essere dipinti sia sfruttando la modalità pennello che attraverso la selezione puntuale del singolo triangolo di cui è composta la maglia poligonale. Come miglioramento degli approcci già codificati, questo sistema consente di eludere la necessità di segmentare geometricamente il manufatto architettonico, posticipando la fase di modellazione ex novo dei componenti geometrici, solo e se necessaria. Esistono, difatti, differenti tipologie di analisi che non richiedono obbligatoriamente una scomposizione formale del manufatto digitale. In tal modo, la scomposizione “fisica” del modello discreto, che comporta evidenti dispendi in termini di analisi e tempi di esecuzione, non è più la condizione indispensabile per annotare semanticamente una architettura.

Inoltre, essendo basato sulla corrispondenza esistente tra lo spazio tridimensionale e il piano 2D, il sistema di etichettatura proposto consente la migrazione delle annotazioni tra diverse rappresentazioni del modello, di cui sfrutta e considera le sole coordinate spaziali per l’associazione di descrittori semantici.



Fig. 10.1.2. Modello digitale di una colonna della chiesa monastica di San Lorenzo. In rosa sono evidenziati i poligoni rilevati per il concetto di capitello.

Per ogni concetto dell’AAT trovato nel modello architettonico (cap. 9), viene creata una mappa semantica cui viene assegnato lo stesso ID univoco con il quale il concetto è registrato all’interno del tesoro del Getty. La mappa è monocromatica: le indicazioni di colore utilizzate per evidenziare i poligoni rilevanti per un determinato concetto, sono registrate in codice binario in cui il bianco indica un’elevata rilevanza, mentre il nero non indica alcuna rilevanza. Pertanto, la mappa registra in un codice visivo quali poligoni, nel modello digitale, sono rilevanti per il concetto rappresentato, utilizzando la mappa UV del modello.

La possibilità di utilizzare i gradienti consente agli annotatori di raffinare la qualità dei dati semantici. In questo modo, è possibile esprimere non solo una rilevanza binaria di ciascun vertice per un dato concetto ma anche un livello di rilevanza per lo stesso. Questa possibilità è importante nel campo del patrimonio architettonico, in quanto non è sempre possibile classificare un elemento in un modo univoco e preciso e diventa utile quando un elemento architettonico non può essere assegnato a una categoria specifica. Lo stesso vale per situazioni in cui non è possibile indicare dove, esattamente, un elemento architettonico diventa un altro, ove ad esempio finisce il capitello per diventare fusto.

L’incertezza di confinamento da parte di un annotatore viene registrata, quindi, sulla mappa sottoforma di una scala di grigi, dando la possibilità all’esperto di esprimere le proprie valutazioni e dubbi sulla classificazione e perimetrazione di un componente geometrico. L’annotatore potrà indicare che in bianco sono evidenziati i poligoni del modello che rispondono al concetto di capitello, ad esempio, al 100% mentre la sfumatura di grigio, registra una percentuale via via sempre più bassa di pertinenza sino a giungere al nero, colore attribuito ai poligoni che non sono associati al concetto di riferimento.

In tal modo, il gradiente consente di focalizzare l’attenzione, e pertanto l’interesse, su quelle aree di una architettura per le quali non vi è una codificazione univoca. Si tratta di parti che enucleano la singolarità dell’elemento studiato, che il sistema quindi non cancella obbligando l’annotatore a una rigida classificazione ma, al contrario, evidenzia per stimolare approfondimenti e ricerche.

È, tuttavia, evidente che la procedura di annotazione non può considerarsi esaustiva se effettuata da un unico esperto di dominio, laddove nel processo di conoscenza, documentazione e analisi del patrimonio costruito, sono coinvolte più professionalità.

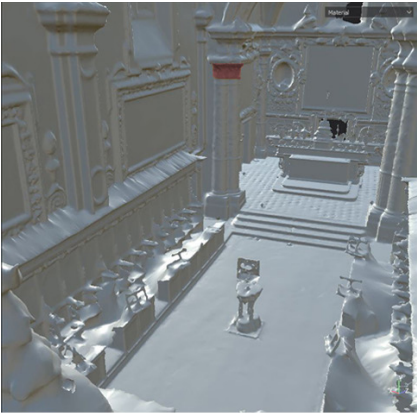


Fig. 10.1.3. Evidenziazione dei poligoni rilevanti per il concetto di capitello. Si noti la corrispondenza esistente tra il modello tridimensionale e lo sviluppo sul piano UV.

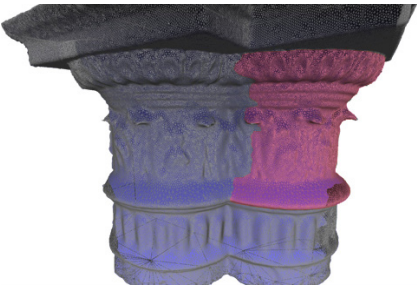


Fig. 10.1.4. Maglia poligonale di dettaglio del capitello. Processo di selezione dei trinagoli rilevanti.

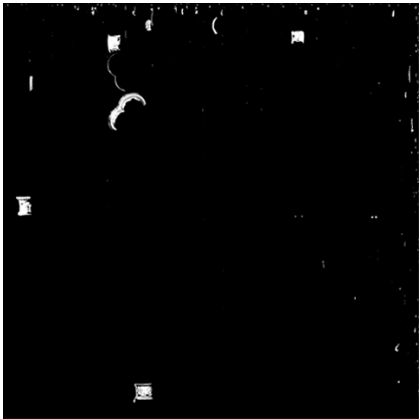


Fig. 10.1.5. Mappa semantica per il concetto di capitello, in codice bianco (bianco = poligoni rilevanti; nero = poligoni non rilevanti).



Fig. 10.1.6. Modello digitale di una colonna della chiesa monastica di San Lorenzo. Il gradiente consente di raffinare l'informazione semantica, evidenziando i poligoni man mano più rilevati per il concetto di capitello.

Il modello teorizzato consente, allora, di considerare le mappe semantiche prodotte da più annotatori per ottenere una mappa finale calcolando i valori medi per ciascuna coordinata UV. Ammettere che un componente di architettura si colleghi a termini semantici secondo diversi livelli di pertinenza, comporta la presa di coscienza della soggettività della valutazione. Classificare un oggetto attribuendogli un determinato peso rispetto ad un vocabolo, è una operazione che ciascun annotatore compie sulla base di una propria scala di valutazione che deve essere poi trasportata ad un determinato valore di una scala continua formalizzata.

La metodologia ha previsto di considerare un numero *n* di annotatori e rappresentare l'incertezza in base al grado di accordo tra questi, incorporando modelli probabilistici in grado di gestire le annotazioni di gruppi che siano ambigue o incomplete, analogamente a quanto è stato fatto in altri campi in cui l'incertezza delle annotazioni è importante, come per le emozioni.

10.2 Sperimentazione e valutazione del modello

Per verificare e validare l'applicabilità ed efficacia del modello teorizzato, sono state organizzate delle sessioni applicative di annotazione condotte da un campione di esperti di dominio su una selezione di concetti architettonici collegati ad un ambiente del caso di studio.

14 esperti del dominio architettonico, con specializzazioni differenti, sono stati reclutati: 2 restauratori, 2 storici dell'architettura, 2 storici dell'arte, 2 esperti di rappresentazione rilievo architettonico, 2 geometri, 2 tecnologi e 2 progettisti.

A ciascun esperto è stato chiesto di annotare, con il metodo descritto in par. 10.1, sul modello digitale della chiesa della certosa di San Lorenzo (cap. 8), 10 concetti architettonici, vagliati tra quelli estratti come indicato al par. 9.2.2.

I concetti selezionati sono:

- presbiterio [concetto C01];
- coro [C02];
- parasta [C03];
- capitello [C04];
- fusto [C05];
- costolone [C06];
- unghia [C07];

- mensa [C08];
- frontone [C09];
- modiglione [C10].

Per escludere dal calcolo delle mappe semantiche, errori legati alla diversa confidenza con il sistema di etichettatura sul modello digitale, il processo di pittura/selezione è stato condotto sempre dallo stesso operatore, estraneo al gruppo di annotatori, sulla base delle indicazioni puntuali fornite dal singolo esperto coinvolto nella sessione.

Per ciascun annotatore, sono state registrate le 10 mappe semantiche, una per ogni concetto considerato, così da raccogliere per ognuno di essi 14 mappe differenti.

La prima riflessione interessante, emersa dalle sessioni di annotazione, è l'influenza che la differente specializzazione degli esperti ha nella loro visione e interpretazione di un oggetto architettonico. Nel confinamento dei concetti, i restauratori prediligono le osservazioni sul comportamento statico della partitura architettonica, eligendo lo schema distributivo del sistema delle forze e dei carichi ad elemento chiave di discernimento. Al contrario, i geometri ed i rilevatori basano le proprie annotazioni sul riconoscimento dei processi geometrici di generazione delle forme spaziali e su criteri di proporzionamento. Altro aspetto di interesse, è la capacità degli esperti di visualizzare e concepire lo spazio architettonico nelle sue tre dimensioni. Gli storici tendono a ragionare sul piano bidimensionale, conducendo le proprie riflessioni guidati spesso dagli aspetti decorativi. Differentemente da quanto sono soliti fare i tecnologi e i progettisti, formati ad una visione dell'architettura intesa nella sua estensione spaziale, plasmata, per la seconda categoria di specializzazione, su criteri di simmetria, di allineamento, di distribuzione.

A lato sono riportate alcune mappe semantiche ottenute per ciascun annotatore per il concetto esemplificativo di capitello (Figg. 10.1.9 a 10.2.1).

Gli annotatori sono stati classificati con le seguenti etichette:

- Re, per i restauratori [2 esperti, Re1 e Re2];
- Sa, per gli storici dell'architettura [Sa1 e Sa2];
- St, per gli storici dell'arte [St1 e St2];
- Ri, per i rilevatori [Ri1 e Ri2];
- Ge, per gli esperti di geometria [Ge1 e Ge2];
- Te, per i tecnologi [Te1 e Te2];

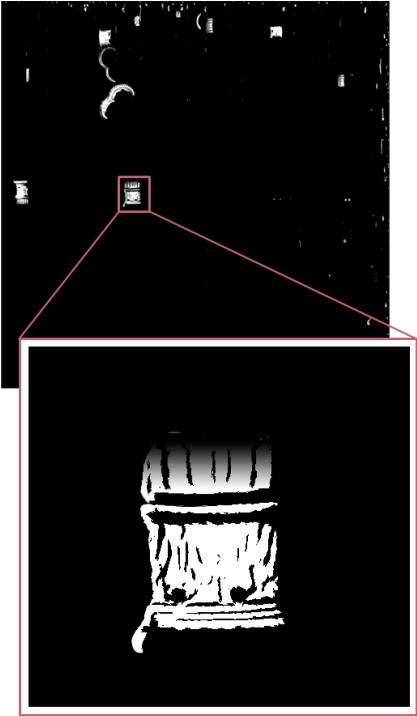


Fig. 10.1.7. Mappa semantica in scala di grigio per il concetto di capitello. Il gradiente consente di esprimere non solo la pertinenza di determinati poligoni rispetto ad un concetto ma anche il grado di rilevanza.

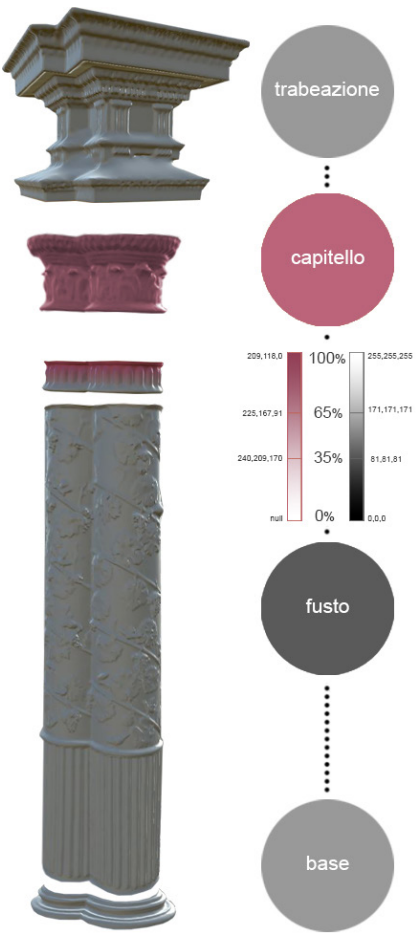


Fig. 10.1.8. Modello digitale di una colonna della chiesa monastica di San Lorenzo, con gradiente. L'annotazione incerta del singolo esperto (sfumatura) si traduce in una scala ordinata oggettiva (scala di grigi con codici numerici).

- Pr, per gli esperti di composizione [Pr1 e Pr2].

Allo scopo di ottenere una unica mappa finale, rappresentativa del grado di accordo degli esperti di dominio in riferimento ad un preciso concetto semantico, è stata calcolata la media tra le singole mappe semantiche. Il processo è stato effettuato in MatLab², attraverso la scrittura di uno script apposito.

```
directory= 'D:\Certosa_San_Lorenzo\Chiesa_RC\Export\
Escaner_Iglesia_1_WS\Annotation_Mask\Substance\C01\';
files = dir(strcat(directory, '*.bmp'));
M= [];
names= {};
corr= zeros(length(files), length(files));
for i=1:length(files)
    mat= importdata(strcat(directory, files(i).name));
    M= cat(3, M, mat.cdata);
    corr(i,i)= 1;
    name= files(i).name;
    name(name == '\.')= '\_';
    names= cat(1, names, name);
end

for i=1:length(files)-1
    for j= i+1:length(files)
        c= corrcoef(double(M(:, :, i)), double(M(:, :, j)));
        corr(i,j)= c(2,1);
    end
end

corr=
rray2table(corr,'RowNames',names,'VariableNames',names);

M= mean(M, 3);
csvwrite(strcat(directory, 'Mean.csv'), M);
M= mat2gray(M);
imshow(M)
imwrite(M, strcat(directory, 'Mean.png'))
writetable(corr, strcat(directory, 'Correlations.csv'),
'Encoding','UTF-8');
```

Attraverso la funzione ‘mean’, il software calcola i valori medi per ciascuna coordinata UV di tutte le 14 mappe inserite nel computo, generando una mappa finale i cui pixel sono esattamente la media di quelli di partenza.

Per comprendere il calcolo programmato in Matlab, occorre fare alcune specificazioni iniziali. Una immagine digitale, dal punto di vista informatico, è un numero discreto di pixel, a ciascuno dei quali è assegnato un indice numerico di locazione ed un valore di livello di grigio o di colore (a seconda delle caratteristiche dell'immagine). Si considera infatti l'immagine digitale come un array 2-dimensionale di valori rappresentanti l'intensità luminosa, ossia come una funzione $f(x,y)$ dove f corrisponde alla luminosità del punto (x,y) mentre x e y sono le coordinate di un singolo pixel. Per convenzione, il pixel $(0,0)$ è quello situato nell'angolo in alto a sinistra. Ciò detto, l'equazione che rappresenta una immagine digitale è

$$f(x,y) = \begin{pmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,n-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(m-1,0) & f(m-1,1) & \dots & f(m-1,n-1) \end{pmatrix} \quad (10.10)$$

Le proprietà fondamentali di un'immagine digitalizzata sono la risoluzione spaziale, la definizione e il numero di piani. La risoluzione spaziale è il prodotto $m \times n$ tra il numero m delle righe e quello n delle colonne dei pixel; ciò significa che l'immagine discretizzata ha m pixel lungo l'asse verticale e n pixel lungo l'asse orizzontale. Per definizione di un'immagine si intende il numero di sfumature distinguibili nell'immagine, mentre il *bit-depth* di un'immagine è il numero di bit impiegato nel codificare il valore di un pixel: per un dato bit-depth di n , l'immagine ha una definizione di $2n$, cioè ogni pixel può assumere un valore in un range di $2n$ livelli. Infine, il numero di piani corrisponde al numero di array di pixel che compongono l'immagine: un'immagine in scala di grigio è composta da un unico piano, mentre una *true-color* da tre piani, uno per componente (rosso, blu e verde). Nel processo teorizzato dalla presente ricerca, le immagini su cui si opera sono binarie: ogni pixel può assumere solo un valore binario (0-1), quindi ci sono solo due valori di intensità (bianco o nero). Da queste, tramite il computo del grado di accordo ovvero dei valori medi di ciascun pixel, si ottiene una immagine a toni di grigio in cui ad ogni pixel viene associato un numero intero positivo che indica l'intensità luminosa del corrispettivo

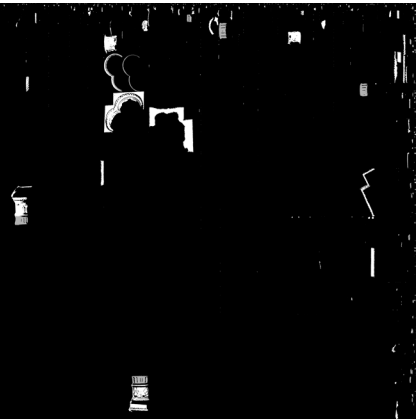


Fig. 10.1.9. Mappa semantica per il concetto di capitello C04, annotatore Ge1.

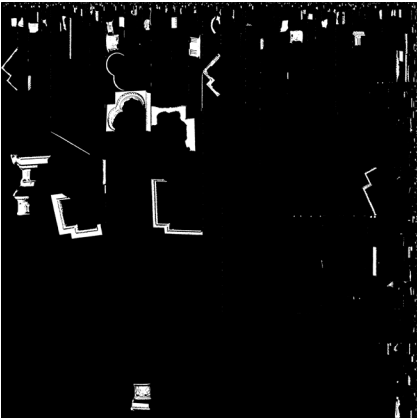


Fig. 10.2.0. Mappa semantica per il concetto di capitello C04, annotatore Pr1.

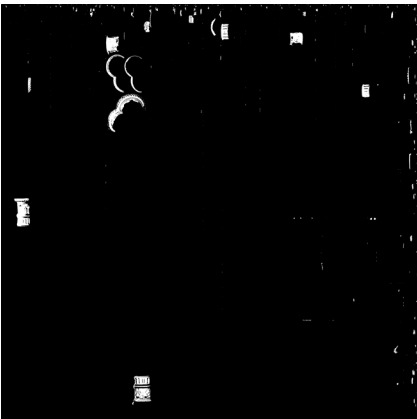


Fig. 10.2.1. Mappa semantica per il concetto di capitello C04, annotatore St2.



Fig. 10.2.2. Mappa semantica finale per il concetto di capitello C04, calcolata come media di tutte le mappe prodotte dagli annotatori.

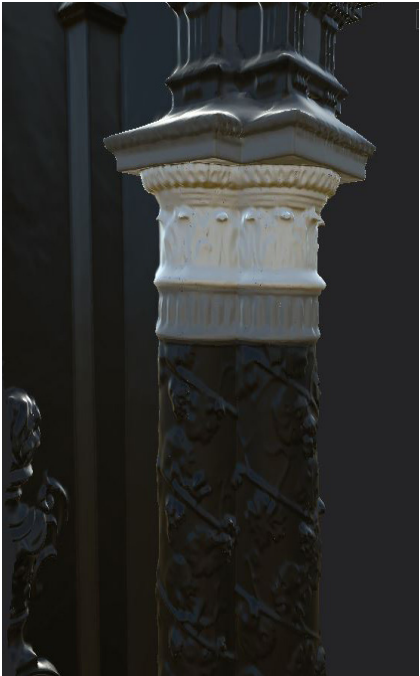


Fig. 10.2.3. Modello digitale di una colonna della chiesa monastica di San Lorenzo. Applicazione della mappa semantica finale del concetto di capitello C04, sulla maglia poligonale. In bianco i poligoni che per tutti gli annotatori sono rilevanti per il concetto esaminato, le gradiazioni di grigio indicano poligoni considerati pertinenti solo da alcuni annotatori. In nero, le parti geometriche che non rispondono al concetto di capitello.

punto dell’immagine³.

Tramite lo script, Matlab visualizza ciascuna mappa semantica come una matrice di dimensioni $m \times n$, i cui elementi sono numeri interi, 0 o 1. Tramite il comando “*mean*”, per ciascun pixel che occupa la stessa posizione in tutte le mappe, è calcolata la media aritmetica. I risultati del calcolo sono scritti in una nuova matrice, corrispondente ad una immagine in scala di grigi, la cui dimensione è sempre definita dagli $m \times n$ pixel delle m righe e n colonne. Gli elementi matriciali assumono, stavolta, valori compresi nell’intervallo che va da 0 a 1.

Contestualmente alla computazione della mappa finale in toni di grigio, il software è chiamato alla stima del grado di accordo tra gli annotatori, effettuata tramite il calcolo del coefficiente di correlazione. La funzione ‘*corrcoef*’ restituisce la matrice dei coefficienti di correlazione di Pearson ossia la correlazione lineare di due variabili. Le mappe semantiche, prodotte dagli annotatori per ogni singolo concetto, sono computate a due a due. La funzione di correlazione stima se le due mappe, le due variabili casuali, si modificano insieme in maniera lineare. Quanto più il valore del coefficiente è vicino a 1, tanto più le due misure variano insieme della stessa quantità. Pertanto, i due annotatori sono d’accordo.

In linea teorica, gli estremi dell’intervallo di computazione sono -1 e 1 perché Pearson considera la possibilità di una correlazione lineare ma inversa. Nel caso studio, l’intervallo è stato ridotto a 0 e 1 poiché ad interessare sono solo le correlazioni lineari dirette.

Note

- 1 <https://www.allegorithmic.com/products/substance-painter>
- 2 https://it.mathworks.com/?s_tid=gn_logo
- 3 Il numero di livelli di grigio corrisponde alla risoluzione in ampiezza dell’immagine.

CAPITOLO UNDICESIMO

Gestione dei modelli digitali e del corpus informativo in
banche dati a grafo, interrogabili da Intelligenze Artificiali

11.1 Applicazione delle mappe semantiche

Le mappe semantiche consentono di esprimere il grado di rilevanza di una determinata porzione di una maglia poligonale rispetto ad un concetto, “colorando” la rilevanza direttamente sul modello tridimensionale e/o sul suo sviluppo nel piano UV, in virtù della relazione geometrica che intercorre tra spazio 3D e piano bidimensionale. Come descritto al cap. 10, la mappa semantica non è altro che una immagine in cui ogni pixel assume un colore che va dal nero al bianco, passando per le sfumature di grigio. Il trasferimento dell’informazione contenuta nella mappa semantica al modello digitale sfrutta, in maniera inversa, la corrispondenza 2D/3D così come già avviene nella modellazione tridimensionale, quando si mettono in relazione i vertici della maglia con i pixel della mappa di colore, allo scopo di generare un modello colorato. Il processo che realizza la proiezione di una mappa di colore bidimensionale sulla superficie di un modello tridimensionale, viene definito *UV mapping*. L’UV mapping - o *UV texturing* - permette ai poligoni che formano un oggetto tridimensionale di essere dipinti coi colori ottenuti da una semplice immagine. L’immagine in questione viene detta *UV texture map*¹. Il processo di mapping consiste nell’assegnare i pixel dell’immagine alla superficie di un poligono, copiando operativamente un pezzo triangolare dell’immagine e incollandolo su un triangolo dell’oggetto². L’intuizione che ne consegue è che, sfruttando l’UV mapping in maniera inversa, sia possibile associare l’informazione di colore contenuta nella

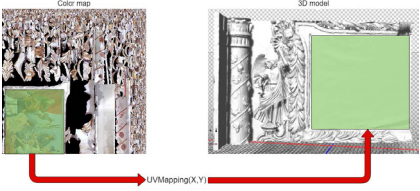


Fig. 11.1.1. Parte del modello della chiesa monastica di Padula con relativa mappa del colore. Esemplificazione del processo di UV mapping.



Fig. 11.1.2. Parte del modello della chiesa monastica di Padula una volta applicata la relativa mappa del colore.

mappa semantica al modello tridimensionale, ricavando in tal modo la rilevanza per un dato concetto semantico (Figura 11.1.3). Pertanto, la mappa semantica è applicata alla maglia poligonale, come una texture al pari della mappa del colore.

11.1.1 Fusione delle mappe

Dato un modello tridimensionale, il numero di concetti ad esso associati può essere considerevole. Di conseguenza pensare di interrogare, a partire da un punto sulla superficie del modello, tutte le mappe semantiche per ottenere pochi concetti totalmente rilevanti, non sembra essere la soluzione migliore. Inoltre, considerando le dimensioni della base di conoscenza (cap. 9), è facile giungere alla conclusione che, anche tenendo solo i termini inerenti al dominio applicativo, il numero di mappe semantiche da gestire e interrogare sia non trascurabile. Per ovviare a questo problema si è deciso di studiare un metodo di fusione delle mappe semantiche, al fine di ottenere una singola mappa per tutto il modello. Lo studio puntuale è stato svolto di concerto con l'unità di Informatica³ del Centro di Ricerca UrbanEco dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

L'idea di partenza è stata la generazione di una singola mappa che contenesse per ogni pixel le informazioni relative ai concetti, registrandole all'interno dei bit che compongono il colore del pixel considerato. Tipicamente un'immagine codifica i colori attraverso il modello di rappresentazione RGB, cui si aggiunge il canale Alpha, regolatore della trasparenza. Considerando immagini con una profondità a 32 bit, si ottiene una rappresentazione ARGB che assegna 8 bit per ogni canale. Ipotizzando un numero massimo di 4 concetti rilevanti per un pixel, un grado di rilevanza che va da 0 a 99 e un identificativo che riesca a coprire potenzialmente tutti i termini dell'AAT (almeno 375000), il numero di bit necessari per rappresentare l'informazione relativa ad un concetto

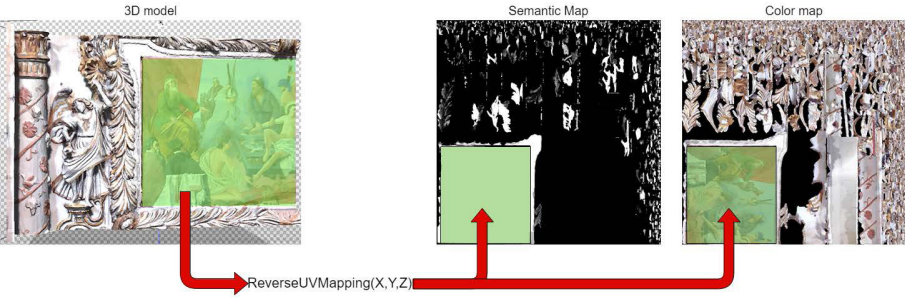


Fig. 11.1.3. Utilizzo dell'UV mapping inverso, per accedere alle coordinate (x,y) di una mappa semantica.

rilevante è dato dalla formula

$$N_c = \lceil \log_2(\max R) \rceil + \lceil \log_2(\max Id) \rceil \quad (11.10)$$

dove:

$\max R$, rappresenta il grado massimo di rilevanza rappresentabile;

$\max Id$, è l'identificativo più grande presente nell'AAT;

N_c , definisce il numero minimo di bit necessario alla rappresentazione della rilevanza e dell'identificativo di un concetto. N_c in questo caso è pari a 26 bit per ogni concetto rilevante.

Evidentemente non è possibile rappresentare le informazioni di 4 concetti nei soli 32 bit che rappresentano il colore. Pertanto, è stato definito un differente approccio orientato ad incrementare lo spazio a disposizione, senza però introdurre ulteriore complessità computazionale. Si è scelto di generare due mappe unificate: nella prima mappa - *relevance map* - sono rappresentati i gradi di rilevanza di ogni concetto, mentre nella seconda - *index map* - sono rappresentati gli identificativi dei concetti semantici. La relevance map sfrutta i 32 bit a disposizione per rappresentare la rilevanza di massimo 4 concetti, riservando 8 bit per ciascuno. Per la index map, la rappresentazione è diversa. Al fine di rappresentare gli identificativi dell'AAT e di tener conto di una eventuale crescita della base di conoscenza, la index map utilizza 4 pixel per ogni pixel presente nella relevance map, generando così un'immagine grande il doppio della relevance map (Figura 11.1.4).

Con l'approccio appena descritto è possibile prendere un numero

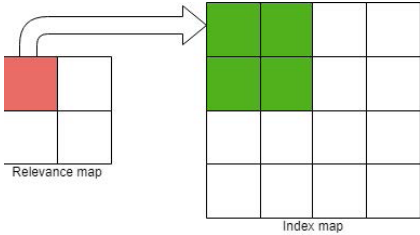


Fig. 11.1.4. Corrispondenza tra un pixel della relevance map e i 4 pixel della index map.

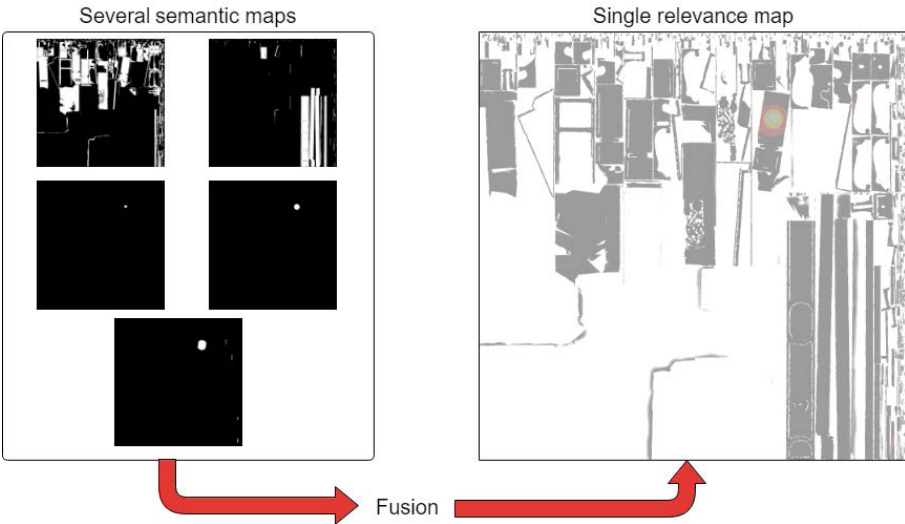


Fig. 11.1.5. Esempio di fusione di mappe semantiche per ottenere una relevance map.

considerevole di mappe semantiche in scala di grigi relative ad un modello e, estrapolando le informazioni di rilevanza, ottenere solo due mappe colorate che racchiudono l'informazione semantica. Tali mappe mantengono la struttura della mappa di colore e di conseguenza possono essere interrogate mediante il meccanismo dell'UV mapping. In base alla densità di concetti e alla rilevanza di questi, le diverse zone della mappa assumono colorazioni differenti (Figura 11.1.5).

11.1.2 Software di visualizzazione e interrogazione: Unreal Engine 4

Ottenuto e caratterizzato semanticamente il modello tridimensionale (capp. 8 e 10), la manipolazione, la visualizzazione e l'interrogazione dei dati spaziali è resa possibile dal software *Unreal Engine 4*⁴ della *Epic Games*. Il programma, creato nel 1988 come applicativo commerciale nel mondo del *gaming*⁵, è stato rilasciato come *realise* pubblica a partire dal 2009. La versione più recente, la UE4 del 2014, presenta implementazioni significative rispetto ai predecessori che ne hanno, di fatto, determinato una grande diffusione negli ultimi due anni, anche in applicazioni diverse dai videogiochi. I miglioramenti interessano in primo luogo il sistema di scripting, sostituito con quello delle *Blueprint*⁶; il sistema di gestione della luce è stato rinnovato introducendo nuovi algoritmi allo scopo di ridurre il costo computazionale e, contemporaneamente, migliorare la qualità del risultato prodotto. Inoltre, l'*editor* ha subito netti miglioramenti atti a minimizzare il tempo di compilazione, consentendo delle modifiche più veloci e avvantaggiando gli sviluppatori nelle attività di *testing*, modifica e ricompilazione.

L' **Unreal Engine 4** (UE4) è strutturato in diverse componenti:

- *sound engine*;
- *physics engine*;
- *graphics engine*;
- *gameplay framework*;
- modulo di *networking*.

Il sound engine è responsabile di gestire suoni e musica all'interno del gioco. La sua integrazione in Unreal permette di riprodurre diversi tipi di file che possono essere utilizzati per scopi molteplici, come suoni ambientali o effetti sonori innescati da determinati eventi.

Il physics engine sfrutta il motore PhysX, sviluppato da NVIDIA, per calcolare le interazioni fisiche degli oggetti, come collisioni e dinamica dei fluidi, consentono comportamenti prossimi a quelli del mondo reale. Nella realtà, difatti, gli oggetti sono governati dalle leggi della fisica, si scontrano e si muovono in accordo con le leggi di Newton e si attraggono in obbedienza alla legge di gravità e alla teoria della relatività di Einstein. La presenza del Physics engine in Unreal consente di riprodurre le leggi reali, lasciando però al sistema la loro gestione.

Il graphics engine è responsabile dell'output visualizzato sul display. Esso raccoglie le informazioni che riguardano la scena (come colori, texture, geometria, ombre, luci e il punto di vista) e considera tutte le interazioni tra i vari elementi che possono influenzare il rendimento grafico della scena stessa. Con le informazioni raccolte, attraverso uno sforzo computazionale non trascurabile, viene riprodotta l'immagine finale. Pertanto, la potenza di un motore grafico influisce su quanto fotorealistica la scena possa apparire.

Il sistema di Input di Unreal Engine può essere configurato attraverso il Gameplay framework, contenente le funzionalità per tracciare l'avanzamento del gioco e controllarne le regole.

Unreal engine fornisce numerosi editor che facilitano il lavoro dello sviluppatore nella creazione del gioco:

- *material editor*, che permette di creare materiali avendo il totale controllo sulle caratteristiche di quest'ultimo;
- *cascade particle system*, che fornisce le funzionalità avanzate per la progettazione e creazione di effetti di particelle, come fumo, scintille e fiamme;
- *sound cue editor*, che permette una gestione avanzata del suono;
- *matinee editor*, che permette la creazione di filmati.

Oltre a questi, il programma fornisce un altro strumento fondamentale che permette una forte personalizzazione. Il sistema di *scripting* visuale delle Blueprint permette allo sviluppatore di estendere funzionalità già presenti, attraverso l'utilizzo di un linguaggio di scrittura visiva. Questo sistema permette di personalizzare il comportamento degli oggetti e la loro interazione senza scrivere righe di codice, rendendo possibile anche ad utenti senza alcuna conoscenza di programmazione, di creare velocemente livelli e di manipolare il flusso di gioco con facilità.

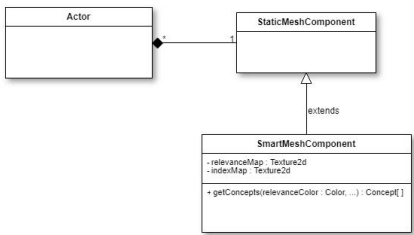


Fig. 11.1.6. Schematizzazione dell'oggetto SmartMeshComponent in Unreal Engine.

La classe principale degli oggetti che partecipano alle dinamiche di gioco è la classe *Actor*. Esistono poi diverse specializzazioni della classe Actor in base ai ruoli particolari che gli oggetti assumono all'interno del gioco. Un Actor non è altro che un contenitore di oggetti specializzati - *Components*, secondo il classico design pattern per videogiochi⁷. La combinazione delle funzionalità dei componenti caratterizza l'oggetto Actor.

11.1.3 Utilizzo delle mappe semantiche in UE4

Per la visualizzazione ed interrogazione del modello digitale, attraverso il recupero delle informazioni registrate nelle mappe descritte nel cap. 10 e par. 11.1.1, è stato realizzato un plugin⁸ chiamato *SmartMaterials*. L'elemento che si occupa di incapsulare e gestire una mesh all'interno di Unreal è l'oggetto *StaticMesh*⁹, mentre l'oggetto *StaticMeshComponent*¹⁰ consente di utilizzare una StaticMesh come un sotto-oggetto di un attore (Actor) all'interno dell'engine (Figura 11.1.6). Il plugin SmartMaterials definisce un'estensione dell'oggetto StaticMeshComponent chiamata *SmartMeshComponent*. L'oggetto definito, oltre ad incapsulare la mesh e la relativa mappa di colore, permette di associare al modello anche la relevance map e la index map (par. 11.1.1). Inoltre, la SmartMeshComponent definisce i metodi di conversione della rappresentazione ARGB dei pixel delle mappe, ottenendo in output degli oggetti di tipo *Concept* che contengono il grado di rilevanza e l'identificativo del concetto che rappresentano. Il plugin realizzato permette, tramite il meccanismo delle collisioni, trattato nel par. 11.3.2, di accedere alla index map e alla relevance map, ottenendo gli identificativi e il grado di rilevanza dei concetti considerevoli per un determinato punto del modello tridimensionale.

11.2 Integrazione delle risorse

11.2.1 Principio di integrazione

Come accennato al par. 10.1, le mappe semantiche sono associate al modello tridimensionale come una texture cui è assegnato il codice ID univoco con il quale ogni concetto semantico è registrato all'interno del tesaurus prescelto, l'AAT. L'uso di mappe semantiche e ID di riferimento per i concetti annotati, consente l'integrazione di più fonti di informazioni (testi, immagini, disegni, audio, video, ecc.). Contestualmente alla etichettatura del modello

tridimensionale attraverso le mappe semantiche, nominate secondo il codice ID tesaurale corrispondente, tutto il corpus documentativo, raccolto e strutturato come indicato al par. 9.2.1, è stato annotato semanticamente. Il riconoscimento all'interno delle fonti documentarie dei medesimi concetti semantici, etichettati nel modello digitale, ha permesso di associare alle componenti testuali gli stessi codici numerici identificativi (Figura 11.1.7). L'ID del tesaurus diventa in tal modo il codice di collegamento di tutta la documentazione eterogenea che sostanzia un bene culturale e che risulta così spazializzata, associata alla geometria puntuale di riferimento. Condividendo lo stesso schema di annotazione, è possibile incrociare le fonti e collegare le descrizioni di uno specifico artefatto in domini separati (Figura 11.1.8). In quest'ottica, il sistema di archiviazione e gestione delle risorse è progettato con una architettura informatica capace di amministrare tipologie di dati differenti e di considerevole quantità, mediante procedure snelle ed altamente performanti. Per tale motivo, si è deciso di archiviare il corpus informativo raccolto in una banca dati a grafo (cap. 6), la cui struttura si presta agevolmente ad essere interpretata da Intelligenze Artificiali e resa accessibile tramite appositi moduli integrati nel software di visualizzazione ed interrogazione della rappresentazione architettonica digitale, l'Unreal Engine (par. 11.3).

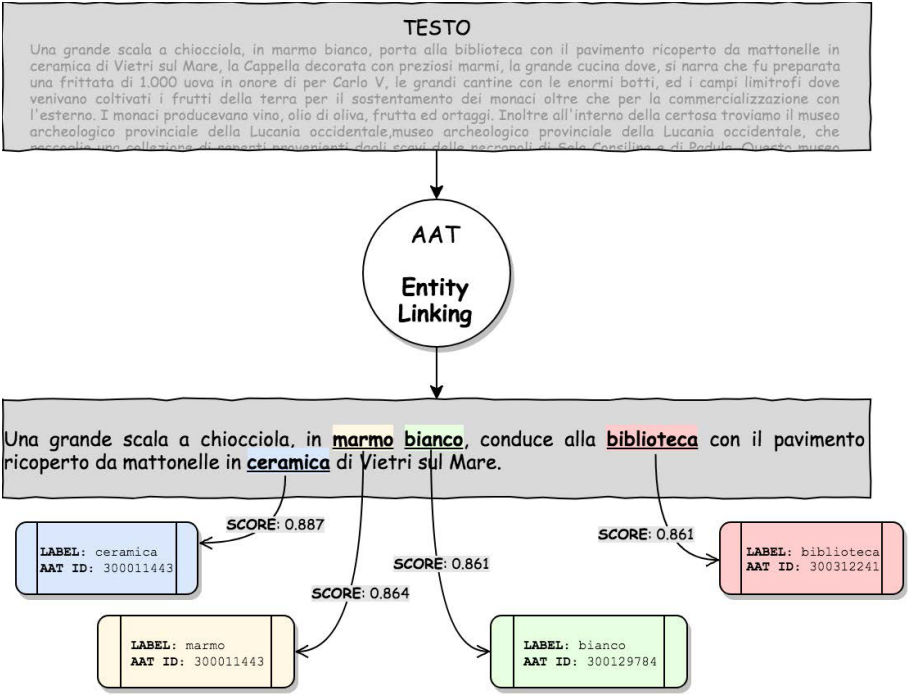
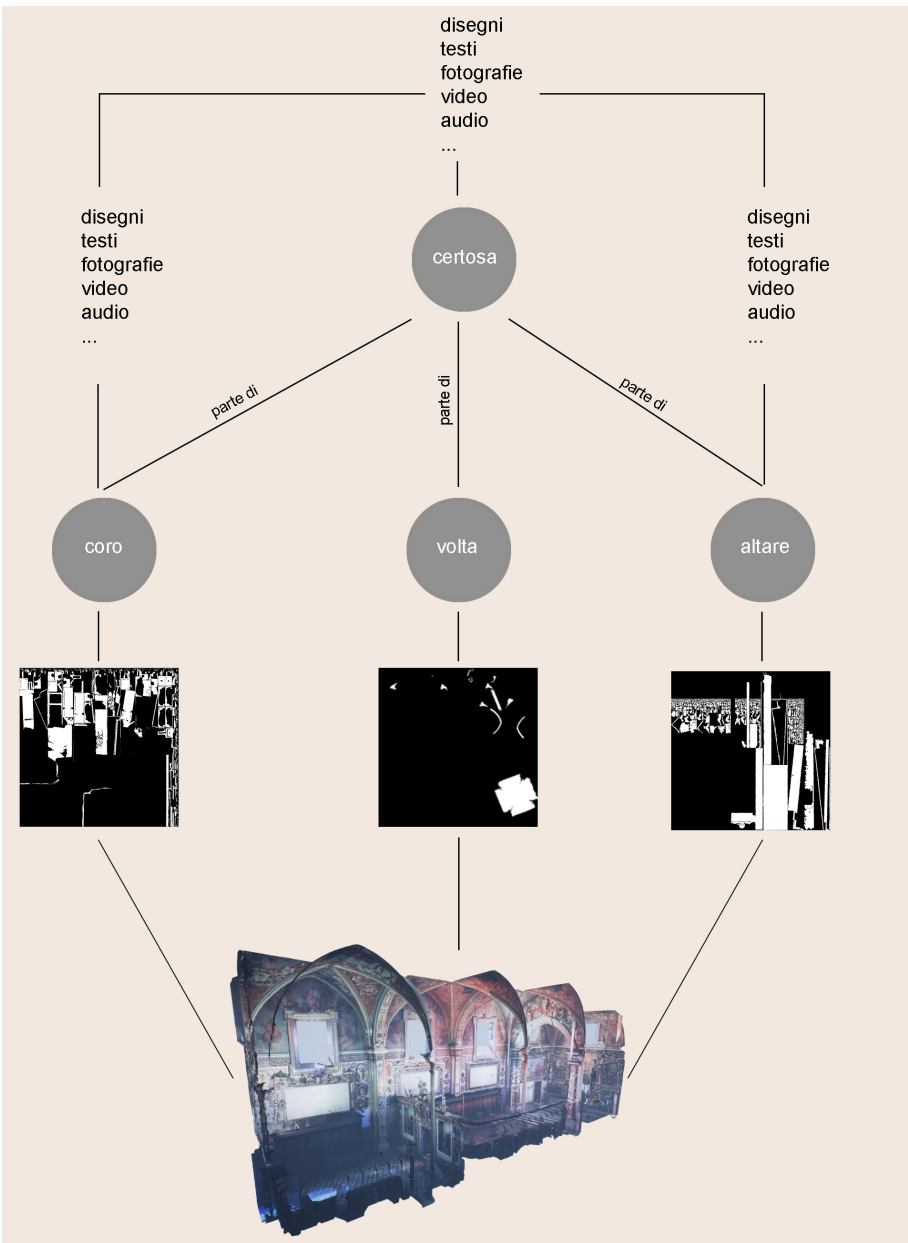


Fig. 11.1.7. Esempio di annotazione delle fonti scritte con i codici del tesaurus AAT.

Fig. 11.1.8. Schematizzazione del sistema di collegamento di tutte le informazioni eterogenee associate al modello tridimensionale attraverso la generazione di mappe semantiche e ID del tesoro.



11.2.2 Il database di conoscenza: Neo4j

Il database di conoscenza prescelto per la ricerca è Neo4j. Si tratta di un database a grafo, open source, che si distingue dal modello a triple RDF (par. 6.2.1) per la possibilità di associare sia ai nodi che alle relazioni, attributi ed etichette. Il modello, anche detto *labeled property graph model*, nasce più o meno nello stesso periodo di RDF dal lavoro di un gruppo di ingegneri svedesi. La

motivazione di base non era tanto lo scambio o la pubblicazione dei dati quanto l’archiviazione efficiente delle risorse che rendesse possibile la formulazione di queries veloci. In un grafo con proprietà etichettate, i vertici sono sempre chiamati nodi cui è associato un ID identificativo univoco e un insieme di coppie *key-value* ossia proprietà che li caratterizzano. Allo stesso modo, le connessioni tra i nodi, chiamate relazioni, hanno un proprio ID, una propria tipologia e un insieme di attributi (Figura 11.1.9).

Come si evince, in un grafo Neo4j sia i nodi che le relazioni hanno una struttura interna che li differenzia dal modello RDF (vedi figura 6.1.8). In aggiunta, le rappresentazioni in Neo4j sono più chiare e sintetiche sia delle triplette che dei database relazionali. Facendo riferimento all’esempio presentato al capitolo 6, in un grafo con etichette e proprietà vi è un singolo nodo per ‘Alice’ con un’etichetta di ‘Persona’. Alice appartiene a 3 diversi dipartimenti cui corrisponde un nodo per ognuno, con un’etichetta di ‘Dipartimento’. Per scoprire a quali dipartimenti appartiene Alice, è sufficiente cercare nel grafo il nodo di Alice, quindi attraversare tutte le relazioni ‘appartiene a’ - che da Alice arrivano ai nodi di dipartimento a cui è connessa (Figura 11.2.0).

Confrontando lo schema di sopra con le figure 6.1.6. e 6.1.7, è immediatamente comprensibile la struttura più compatta e snella di un grafo Neo4j e, conseguentemente, le maggiori possibilità di inferenziazione delle risorse. La stessa sintassi delle queries, formulate con il linguaggio dichiarativo *Cypher*, specifico di Neo4j, pur essendo basata sui concetti e le clausole di base di SQL, ha molte funzionalità aggiuntive specifiche di un database a grafo che facilitano il lavoro di recupero delle informazioni. Nel capitolo 6, è stato mostrato come la scrittura di un’istruzione SQL, in un database relazionale, con un numero elevato di join, faccia perdere spesso rapidamente di vista ciò che la query effettivamente richiede, a causa



Fig. 11.1.9. Esempificazione della struttura di un database labeled property.

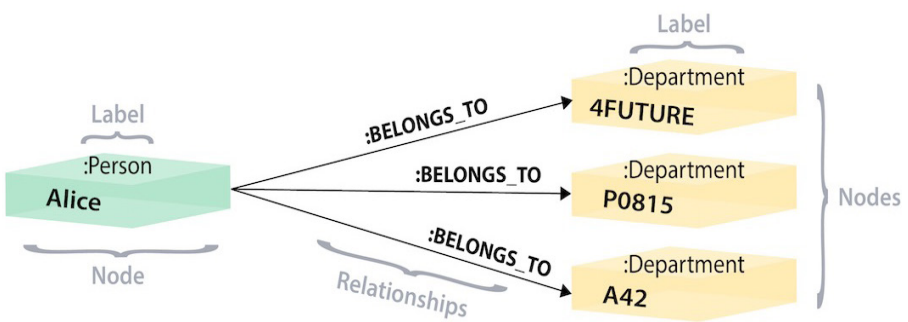


Fig. 11.2.0. Collegamento tra le risorse in Neo4j.

di tutto il rumore tecnico nella sintassi SQL. In Cypher, la sintassi rimane concisa e focalizzata sui componenti del dominio e sulle loro connessioni, esprimendo la ricerca o la creazione di dati in modo più visivo e chiaro. Ciò è facilmente intellegibile se, considerato il dominio organizzativo del precedente esempio di modellazione dei dati presentato al capitolo 6, si confronta l'istruzione in SQL espressa nella 6.10 con l'istruzione Cypher che segue.

```
MATCH (p:Person)-[:WORKS_AT]->(d:Dept)
WHERE d.name = "IT Department"
RETURN p.name
```

(11.11)

Il vantaggio di un database come Neo4j in cui sono associate proprietà ed etichette anche a nodi e relazioni, si esprime anche con riferimento al modello a triple RDF.

Riprendendo l'esemplificazione proposta al paragrafo 6.1.1, sulla rappresentazione delle informazioni relative all'album musicale *Sketches of Spain* di Miles Davis, l'espressione dei dati in Cypher risulta la seguente (Figura 11.2.1).

La semantica è evidentemente la stessa ma la sintassi è decisamente più compatta, più coincisa e più espressiva. La stessa espressione grafica del

```
CREATE (sos:Resource:MusicAlbum { name: "Sketches of Spain",
                                description: "Album by Miles Davis",
                                genre: "Jazz"})

CREATE (dd { license: "Creative_Commons_Attribution-ShareAlike_3.0_License",
              url: "http://en.wikipedia.org/wiki/Sketches_of_Spain",
              articleBody: "...between Nov 1959 and Mar 1960 at the Columbia 30th St Studio in NY City"})

CREATE (sos)-[:goog_detailedDescription]->(dd)

CREATE (sos)-[:award]->({ name: "Grammy Hall of Fame" })
CREATE (sos)-[:byArtist]->({ name: "Miles Davis" })
CREATE (sos)-[:producer]->({ name: "Teo Macero" })
CREATE (sos)-[:producer]->({ name: "Irving Townsend" })
```

Fig. 11.2.1. Esempio di rappresentazione delle informazioni in Cypher, per il database a grafo Neo4j.

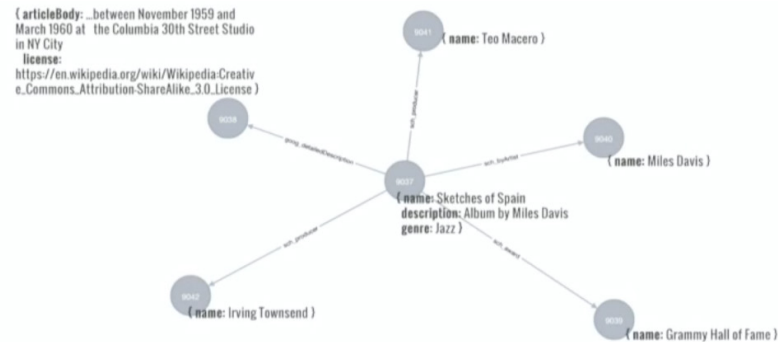


Fig. 11.2.2. Esempio di rappresentazione grafica delle informazioni presentate in 11.2.1, per il database a grafo Neo4j.

modello riflette tale compattezza ed espressività (Figura 11.2.2).

Se si paragona l'immagine 11.2.2 con la figura 6.2.1, si nota immediatamente la differenza tra il grafico Neo4j e quello RDF. Anche se alcuni elementi sono in comune, i due modelli sono completamente diversi poiché i nodi di Neo4j hanno una propria struttura interna tale che i valori degli attributi non rappresentano nuovi vertici nel grafico. Al centro della rappresentazione è ancora l'album, collegato a un certo numero di entità, ma il titolo, il nome e la descrizione non sono più rappresentati come nodi separati.

Le caratteristiche del *labeled property graph model* Neo4j lo rende particolarmente idoneo per l'estrazione di percorsi tra records ovvero per la formulazione di ragionamenti complessi su un gruppo di risorse estremamente vasto e connesso, come quello della ricerca presentata. Per tale motivo, tutto il corpus documentativo, raccolto e strutturato semanticamente, è stato riversato nel database utilizzando i codici ID del tesauro AAT come chiave di collegamento. Il tesauro, fornito dal Getty in formato RDF, è stato quindi preliminarmente convertito in Neo4j (Figura 11.2.3). Effettuata la conversione, la ricerca e recupero dei records è reso possibile tramite il software di visualizzazione e manipolazione dei modelli architettonici digitali.

11.3 Research e retrieval delle risorse nel repository

Per accedere, recuperare e consultare tutte le tipologie di risorse, annotate semanticamente, è stato progettato un sistema che sfrutta l'interfaccia grafica

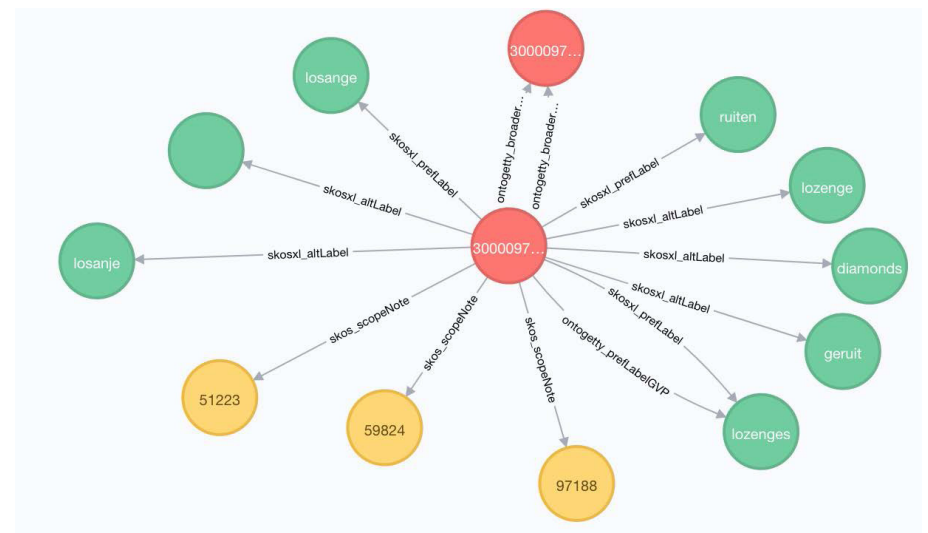


Fig. 11.2.3. Una ridotta parte del tesoro del Getty trasferito nel database a grafo Neo4j. (Concetto di losanghe).

di UE4 ovvero la visualizzazione ed interazione diretta con il modello digitale. Il recupero dei records raccolti e archiviati è reso possibile tramite una manipolazione tradizionale dei dati spaziali con una periferica classica come il mouse.

La ricerca, tuttavia, si inserisce all'interno di un progetto di interesse nazionale, il PRIN CHROME, incentrato su una interazione multimodale con rappresentazioni digitali del patrimonio architettonico culturale (introduzione, III. Caso applicativo).

Pertanto, il sistema esposto è stato strutturato per consentire di accedere e reperire le risorse anche con una interrogazione non tradizionale, basata sul linguaggio naturale, *Natural Language Processing* - NLP.

11.3.1 Natural Language Processing e architettura di sistema

Il Natural Language Processing - NLP¹¹ è un area di ricerca che esplora come i computer possano essere usati per interpretare e manipolare il linguaggio naturale per fare cose utili. In particolare, i segnali di input considerati per una interazione multimodale sono il parlato ed il puntamento inteso come il movimento del corpo, i gesti.

Affinché una Intelligenza Artificiale sia in grado di elaborare il linguaggio naturale di interrogazione, è necessario progettare un sistema la cui architettura sia articolata in specifiche componenti, in comunicazione tra loro.

Nell'ambito del progetto CHROME, la struttura è stata concepita allo scopo di creare una esperienza immersiva. L'ambiente in cui avviene l'interazione è formato da uno schermo curvo alto 2.5 m e largo 4.4 m (Figura 11.2.4). Lo schermo è utilizzato per proiettare una rappresentazione architettonica digitale, relative al caso studio (le certose campane). Una Kinect 2 è posizionata a terra al centro dello schermo. Per lo sviluppo del sistema è stata realizzata un'architettura distribuita che permette di separare le responsabilità e di rendere ogni elemento riutilizzabile, indipendentemente dagli altri.

La Kinect ha lo scopo di rilevare i segnali dell'utente (gesto di puntamento e richieste sonore) e di inviarli al game engine, l'Unreal Engine 4, che gestisce il modello e l'ambiente tridimensionale. Per rilevare l'interazione dell'utente col sistema, lo stesso integra tre moduli: (i) *Natural Language Understanding* - NLU, che si occupa di elaborare il parlato fornendo un'interpretazione semantica; (ii) *Pointing Recognition* - PR, che ha la responsabilità di rilevare quale oggetto sta indicando l'utente; (iii) *Active Speaker Detection* - ASD, che

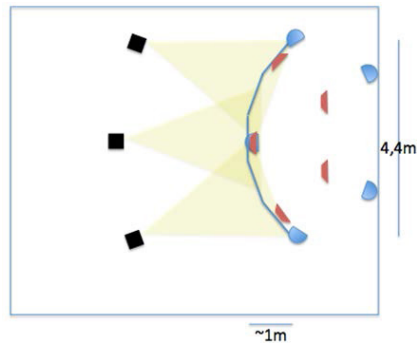


Fig. 11.2.4. Composizione dell'ambiente di interazione.

ha il compito di rilevare l'ultimo utente che ha parlato. L'UE è collegato ad un sistema di dialogo multimodale che provvede ad interpretare le intenzioni dell'utente, raccolte dall'Unreal Engine, fornendo la risposta più appropriata. Il sistema di dialogo è stato sviluppato mediante l'utilizzo del framework *OpenDial*¹² e i segnali catturati sono analizzati ispirandosi ai classici pattern architeturali per sistemi multimodali¹³, adottando un approccio ibrido basato su regole probabilistiche¹⁴.

I dati utili a rispondere alle richieste dell'utente risiedono nella base di conoscenza, archiviata nel database a grafo Neo4j (par. 11.2.2). Una volta recuperati i dati, la risposta è generata in funzione della profilazione dell'utente (utente esperto, utente comune, adulto, bambino) ed espressa sotto forma di testo che il game engine comunica al motore di sintesi vocale, Mivoq¹⁵. La comunicazione tra le varie componenti avviene attraverso il *message broker* RabbitMQ¹⁶ (Figura 11.2.5).

11.3.2 Recupero dei dati tramite puntamento

Ai fini dello studio presentato, il segnale di input ritenuto più significativo, tra quelli possibili del linguaggio naturale per interrogare la banca dati, è il puntamento. Un utente può indicare una parte del modello digitale e tramite il suo gesto, recuperare tutte le informazioni associate, con descrittori semantici, a quella parte di geometria.

I gesti giocano un ruolo fondamentale nell'interazione sociale e vengono considerati uno dei principali veicoli di comunicazione non verbale. Questo tipo di espressione umana può essere vista come un canale di comunicazione parallelo, che spesso fornisce un significato complementare alla comunicazione verbale.

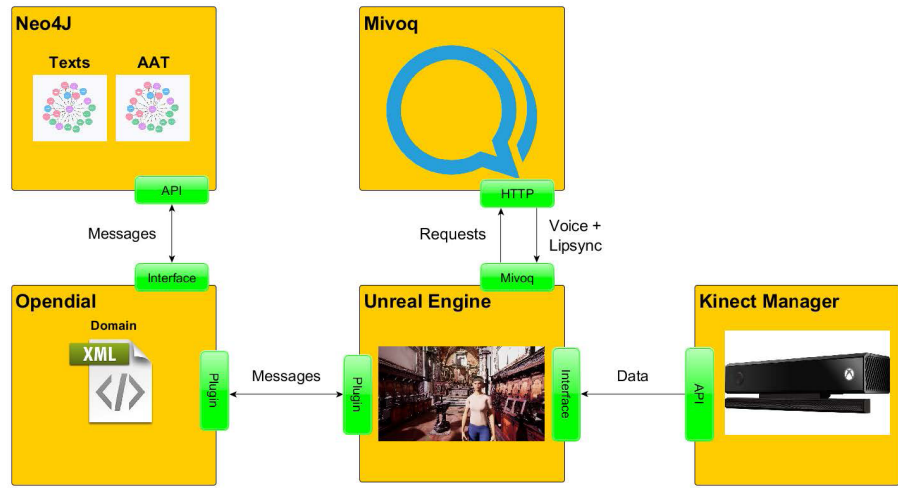


Fig. 11.2.5. Architettura del sistema di interrogazione.

I gesti che occorrono insieme al parlato possono essere divisi in diverse classi: *deictic*, *iconic*, *metaphoric* e *beat gesture*¹⁷. In particolare, i gesti appartenenti alla classe deictic sono quelli utilizzati per riferirsi ad oggetti fisici nello spazio, di cui il più comune è proprio il puntamento. Spesso gli esseri umani si riferiscono ad oggetti specifici utilizzando il puntamento e omettendo l'informazione verbale. Diversi studi in scienza cognitiva dimostrano come il puntamento sia uno dei primi gesti ad essere appresi, essendo già rilevabile intorno ai 12 mesi di età¹⁸. Per questo motivo il puntamento è uno di quei gesti che può essere considerato naturale.

Per il raggiungimento dello scopo della ricerca, il punto di partenza è tracciare l'utente all'interno dell'ambiente digitale per comprendere il suo gesto dove è rivolto.

Le tecniche adottate per tracciare l'utente e riprodurre i suoi movimenti in tempo reale sono state implementate mediante l'uso combinato di Unreal Engine 4 e della Kinect 2. Per gestire i dati provenienti dall'hardware della Kinect, all'interno del game engine è stato utilizzato il plugin *Kinect 4 Unreal* - K4U)¹⁹. K4U è un *middle-ware* che permette agli sviluppatori di usare il sistema di scripting visuale - il *Blueprint visual scripting system*²⁰ - adottato da Unreal per accedere a tutte le funzionalità offerte dalla Kinect 2. Il plugin implementa un modulo chiamato *Kinect Interface Component* che fornisce un gran numero di nodi Blueprint, ognuno dei quali garantisce l'accesso a specifiche funzionalità della Kinect.

A partire da questi nodi, la Kinect è stata riprodotta all'interno dell'ambiente di gioco come un attore. In questo modo la sua posizione viene utilizzata come un punto di partenza dal quale calcolare nel tempo la posizione assoluta degli utenti tracciati. Inoltre, l'informazione dell'angolo di provenienza delle sorgenti sonore calcolato dalla Kinect è stato riprodotto all'interno dell'ambiente di gioco come una freccia, un *Arrow Component*, che cambia il suo orientamento in base alla direzione di provenienza del suono.

Utilizzando il plugin K4U è possibile realizzare un'associazione tra i corpi tracciati dalla Kinect e gli *Skeleton Asset* forniti da Unreal Engine 4.

Come definito nella documentazione di Unreal²¹, uno scheletro è un framework digitale gerarchico che viene utilizzato per definire ossa o giunti in un personaggio e che in qualche modo mima uno scheletro biologico. Di conseguenza l'oggetto Skeleton Asset è utilizzabile, insieme ai dati ricevuti dalla Kinect, per tracciare i movimenti dell'utente.

Il processo adottato può essere suddiviso in una sequenza di passi. Il primo passo è quello di posizionare una *Skeletal Mesh*²², una per ogni

utente tracciato, nell'ambiente calcolandone la posizione a partire dai dati forniti dalla Kinect. La Skeletal Mesh è un oggetto fornito da Unreal Engine 4 utilizzato per costruire la superficie 3D di uno Skeleton Asset (Figura 11.2.6). Posizionata la Skeletal Mesh, il game engine, attraverso l'utilizzo di un'*Animation Blueprint*²³ e i dati in tempo reale forniti dalla Kinect, modifica la configurazione dello Skeleton Asset.

Una volta riprodotto, l'utente viene visto come un attore che è in grado di interagire attivamente con tutti i componenti della scena(Figura 11.2.7). L'interazione è codificata attraverso eventi di collisione, analizzati a partire dalle componenti "scheletriche" dell'attore/utente (Figura 11.2.8).

Lo Skeleton Asset fornito da Unreal Engine è modellato come un insieme di giunti interconnessi (ad esempio spalla, polso), rappresentati da vettori. Rilevate le posizioni dei giunti della spalla e della mano (destra o sinistra a seconda del braccio utilizzato dall'utente), è possibile ottenere il vettore che li unisce. Tale vettore può essere prolungato all'infinito al fine di proiettare un raggio che permetta di identificare la direzione di puntamento. Il raggio in questione genera un evento collisione quando incontra un oggetto lungo il suo percorso. Dalla collisione sono estratte sia le coordinate dell'impatto all'interno del mondo di Unreal, sia le coordinate UV relative all'oggetto impattato. Le coordinate UV ottenute sono utilizzate per interrogare le mappe relative ad un oggetto SmartMeshComponent: una volta rilevato il punto d'impatto sulla relevance map e la index map, è possibile estrarne i colori e analizzarli ottenendo i concetti rilevanti col rispettivo grado di rilevanza. A questo punto, essendo le mappe semantiche registrate con il codice ID del tesaurus, recuperato con il puntamento il concetto rilevante per la porzione di geometria indicata, è possibile accedere a tutte le altre

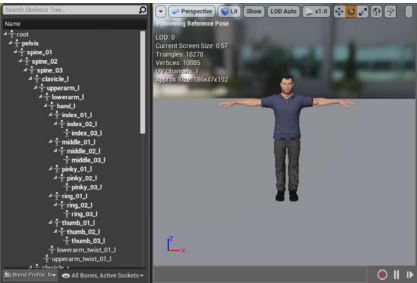


Fig. 11.2.6. Skeletal Mesh utilizzata per proiettare l'utente all'interno della scena.

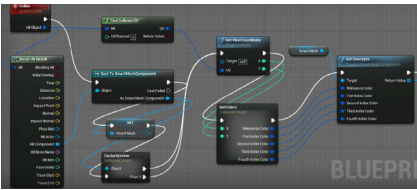


Fig. 11.2.8. Blueprint che gestisce l'evento collisione e recupera i concetti associati ad un punto di impatto.



Fig. 11.2.7. Riproduzione degli utenti e dei loro movimenti nella scena 3D.

informazioni eterogenee (documenti, video, immagini, ecc.), collegate al modello e annotate con lo stesso principio. Il recupero dei dati, affidato alla base di conoscenza a grafo Neo4j, consente di estrarre non solo la documentazione associata alla geometria in maniera puntuale ma rende possibile, parimenti, la concatenazione di risorse diverse, estraendo percorsi di aggregazione multilivello e non banali. In questa prospettiva, il sistema progettato si configura non esclusivamente come un repository di informazioni. L’accumulo sempre più massivo nel tempo di dati, raccolti e registrati nel database con il metodo di annotazione codificato nella ricerca, ammette lo sfruttamento di tecniche di deep learning capaci oltre a restituire il collegamento incrociato tra le risorse, anche di sviluppare ragionamenti di supporto decisionale.

Note

1 Mullen, 2012.

2 Murdock, 2008.

3 Nello specifico, il lavoro di fusione delle mappe semantiche rientra nella tesi di laurea magistrale in Informatica, Interazione naturale in ambienti 3D annotati semanticamente, del dott. Marco Grazioso, discussa presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell’Informazione della Federico II. Si ringraziano, congiuntamente, per la ricerca condotta il prof. Francesco Cutugno e il dott. Ph.D. Antonio Origlia, P.I. e ricercatore del progetto CHROME.

4 <https://www.unrealengine.com/en-US/what-is-unreal-engine-4>

5 Sanders, 2016.

6 <https://docs.unrealengine.com/latest/INT/Engine/Blueprints/>

7 Nystrom, 2014.

8 Attraverso i plugin e utilizzando il linguaggio di programmazione C++, l’Unreal Engine fornisce agli sviluppatori un utilissimo metodo per accedere a tutte le funzionalità base, fruibili anche attraverso l’editor visuale, ed estendere tutte le classi di oggetti definite dalle librerie core del motore. Tali plugin possono essere aggiunti al motore stesso, rendendo il plugin utilizzabile in qualsiasi progetto, oppure essere installati all’interno di un singolo progetto.

9 <https://docs.unrealengine.com/en-us/Engine/Content/Types/StaticMeshes>

10 <https://docs.unrealengine.com/en-us/Engine/Components/StaticMesh>

11 Liddy, 2001; Chowdhury, 2003; Jurafsky e Martin, 2008.

12 Lison e Kennington, 2016.

13 Dumas, et al., 2009.

14 Lison e Kennington, 2015.

15 <https://www.mivoq.it/>

16 <https://www.rabbitmq.com/>

17 McNeil, 1992; Cassell, 1998; Eisenstein e Davis, 2004.

18 Lieven, et al., 1998.

19 <http://www.opaque.media/kinect-4-unreal/#about-k4u>

20 <https://docs.unrealengine.com/latest/INT/Engine/Blueprints/>

21 <https://docs.unrealengine.com/latest/INT/Engine/Animation/Skeleton/>

22 <https://docs.unrealengine.com/latest/INT/Engine/Content/Types/SkeletalMeshes/>

23 <https://docs.unrealengine.com/latest/INT/Engine/Animation/AnimBlueprints/>

CAPITOLO DODICESIMO

Conclusioni e prospettive di ricerca future

La ricerca ha affrontato il tema della spazializzazione della documentazione relativa al costruito storico attraverso la definizione di un modello volto alla strutturazione semantica di rappresentazioni architettoniche digitali. La formalizzazione del sistema ha perseguito la volontà di facilitare la raccolta, l’archiviazione, l’inferenza e lo scambio di conoscenza relativa al patrimonio culturale. Il protocollo codificato si basa sull’impiego di modelli tridimensionali quale supporto per l’annotazione all’interno di un processo che registra l’ambiguità e l’incertezza di associazione semantica degli esperti di dominio. L’incertezza è stata trattata come informazione, da problema è diventata dato e quindi risorsa, archiviata in piattaforme informatiche informative secondo formati e linguaggi interrogabili da Intelligenze Artificiali, al fine di ottimizzare la condivisione, l’interoperabilità e la creazione collaborativa di conoscenza.

Il proposito generale dello studio è stato perseguito metodologicamente scomponendo la domanda di ricerca in sotto richieste via via più elementari, cui è stata fornita una possibile risposta risolutiva. La validità della proposta è stata valutata in base agli esiti della sua applicazione sperimentale sul caso studio: le tre certose della Campania e, in particolare, il cenobio di San Lorenzo, a Padula.

La prima domanda di ricerca specifica ha interessato l’ambiguità dell’annotazione semantica. Analizzatene le ragioni e ricollegatele a questioni lessicali, l’ambiguità è stata risolta con l’adozione di un tesaurus,

specifico del dominio di conoscenza dell'architettura, *l'Art and Architecture Thesaurus* del Getty Research Institute. L'inquadramento all'interno di regole ontologiche e vocabolari di dominio controllato del processo di strutturazione semantica delle informazioni, fornisce una soluzione convincente alla questione poiché facilita al contempo il ragionamento sull'elemento annotato e permette alle risorse di diventare parte del più ampio Web Semantico. In particolare, quando un termine semantico è tratto dal tesoro di dominio controllato e associato ad una forma tridimensionale come etichetta, un significato più ricco e più esplicito viene attribuito all'annotazione, migliorando la sua interpretabilità. L'annotazione di attributi di basso livello di componenti tridimensionali rende possibile, difatti, l'inferenza semantica associando in maniera automatica etichette di livello superiore.

In aggiunta, la selezione di un tesoro come l'AAT, formalizzato a livello internazionale, consente di raffinare la qualità dell'annotazione, implementa l'interoperabilità delle risorse e definisce un campo comune di ragionamento tra annotatori.

L'internazionalizzazione del lessico, tuttavia, testato per il ristretto campo delle certose campane, ha evidenziato la complessità dell'operazione di significazione semantica, in un contesto transnazionale. La diversità linguistica, con la contrazione o espansione delle disponibilità lessicali, si relaziona con la ricchezza terminologica del dominio di conoscenza. Una risoluzione definitiva è difficilmente individuabile laddove lo studio ha mostrato la necessità di valutare caso per caso l'esistenza e validità di traduttori multilingue. L'indirizzo indicato dalla ricerca si fonda, pertanto, su una stretta cooperazione tra linguisti e architetti, coinvolti nel processo come esperti di dominio.

La seconda questione implicata nel processo di descrizione semantica di un corpus documentativo ha investito i sistemi di acquisizione dei dati spaziali, intorno ai quali le risorse informative devono strutturarsi. Ad oggi, il panorama di metodologie e strumenti per la registrazione delle informazioni metriche e colorimetriche di complessi architettonici è più che mai vasto. Ciascuna strumentazione, impiegata secondo un disciplinare operativo specifico e codificato, possiede delle potenzialità che acquisiscono valore e significatività solo se rispondenti allo scopo dell'operazione di rilievo. Le diverse esperienze di rilievi digitali tridimensionali hanno mostrato come non esista una metodologia unica che escluda le altre per la sua superiorità. L'integrazione fra soluzioni e tecnologie diverse rappresenta sempre, quando è possibile condurla, l'approccio migliore. In questa ottica, la ricerca ha puntato alla sperimentazione di una procedura che ha

consentito di coniugare la precisione metrica - propria dei sistemi ottici attivi - con la fedeltà visiva - caratteristica della tecnica fotogrammetrica - nel rispetto di tempi di acquisizione e processamento ridotti, a vantaggio di un livello di accuratezza ed economicità delle strumentazioni elevato. Il protocollo valutato è stato incentrato sull'uso di un applicativo software in cui è stato possibile, in un unico ambiente di lavoro, processare e integrare i dati provenienti da sensori differenti. I risultati ottenuti, in termini di tempo e ancor più di accuratezza e precisione, geometrica e visiva, del modello digitale finale, sono stati considerati più che soddisfacenti per le finalità della ricerca, a valle di un confronto con i passaggi operativi di integrazione del corpus informativo più consolidati.

Resta, d'altra parte, ancora indiscussa la necessità di integrare le metodologie di rilievo per sopperire e mitigare i limiti dei diversi sensori nonché l'onerosità dell'intero processo di modellazione che la procedura testata ha permesso di contrarre ma non ridurre completamente.

Ottimizzata la procedura di raccolta e processamento dei dati spaziali, sino alla generazione di un modello digitale texturizzato, la sfida successiva è stata l'interpretazione e filtraggio delle informazioni. La dimensione dei file degli oggetti digitali tridimensionali, sotto forma di maglie poligonali strutturate, rappresenta spesso un problema per l'interazione con gli stessi, sia in ambienti di renderizzazione che all'interno delle banche dati. La pulitura e filtraggio dei dati è il presupposto per la restituzione di modelli che siano adeguatamente intelligenti - nel senso di informativi in aderenza allo scopo dell'analisi - con un giusto peso dal punto di vista tecnico-informatico. In considerazione delle diverse tecniche di semplificazione selettiva del livello di dettaglio di un modello poliedrico, finora codificati, lo studio ha selezionato tra questi il processo di *vertex merging* tramite l'algoritmo *Quadric Edge Collapse Decimation*, le cui caratteristiche sono state ritenute adeguate per gli scopi del progetto. Il rispetto della topologia di partenza e il grado di discostamento geometrico post-semplificazione, sono stati verificati con il calcolo della distanza di Hausdorff. Un processo di *texture baking* è stato esplicitato per il recupero dell'esperienza visiva della rappresentazione digitale. Mappa del colore, delle normali e di occlusione ambientale sono state registrate per simulare gli attributi geometrici e i comportamenti di quei poligoni non presenti realmente nella scena, in virtù della semplificazione geometrica, annullando visivamente la divergenza tra la mesh high poly e quella low poly.

Il cuore della ricerca è rappresentato dalla metodologia di scomposizione del modello digitale in elementi geometrici primitivi, corrispondenti a

concetti semantici, in ragione dell'incertezza che governa il processo. L'incertezza cui si fa riferimento è quella di confinamento: un annotatore, sia un esperto di dominio che un utente comune, può essere incerto sulla perimetrazione di un elemento architettonico, cui associare un descrittore semantico. La pluridisciplinarietà, nella dimensione della differente specializzazione di un esperto di dominio, contribuisce all'indecisione nella misura in cui, sebbene un concetto sia codificato e condiviso, la diversa formazione dell'annotatore condiziona il modo di vedere e interpretare un medesimo episodio architettonico. L'incertezza dell'annotazione è, quindi, strettamente dipendente dall'annotatore e legata, contestualmente, all'elemento architettonico da etichettare, la cui definizione non si esaurisce nella sua ricostruzione geometrica. Aspetti morfologici, strutturali, materici ancorché di visualizzazione grafica concorrono nel riconoscimento linguistico e semantico di una forma. Il supporto su cui avviene la strutturazione semantica influisce nel processo dal momento che le differenti modalità di rappresentazione e di visualizzazione del medesimo elemento forniscono più o meno informazioni, in relazione al tipo di analisi che si vuol condurre. Sistemi che organizzano quindi le informazioni attorno a una singola rappresentazione limitano lo studio che non può esaurirsi in un solo supporto bidimensionale (come pianta, sezione trasversale, ortofoto) né a una singola rappresentazione tridimensionale (nuvola di punti o modello poliedrico). Alla luce delle considerazioni maturate, la ricerca ha formalizzato un sistema di semantizzazione dei dati spaziali capace di affrontare l'incertezza di annotazione registrandola e trasformandola in informazione, riconoscendole un elevato peso documentativo e scientifico. L'obiettivo è stato raggiunto con l'impiego di mappe semantiche. Si tratta di mappe in scala di grigi che, in virtù della corrispondenza geometrica tra elementi tridimensionali e spazio UV, indicano quali porzioni dell'oggetto complessivo sono rilevanti per un determinato concetto semantico e con quale grado di rilevanza. Le mappe, associate al modello come una texture, sono ottenute impiegando un applicativo commerciale in cui “dipingere” i poligoni associati ad un concetto, direttamente sul modello e/o sul suo sviluppo sul piano immagine UV. Agli annotatori è così fornito uno strumento che rende il processo di annotazione di masse tridimensionali facile, fluido e decisamente speditivo, abilitando l'associazione di parti e sotto-parti attraverso una interfaccia comoda per l'interazione. Inoltre, il sistema, fin qui, costituisce già un miglioramento degli approcci codificati laddove consente di eludere la necessità di segmentare geometricamente il manufatto architettonico, posticipando la fase di modellazione ex novo dei componenti geometrici, solo e se necessaria. In aggiunta, si presenta flessibile e variabile in relazione alla tipologia di

analisi e scomposizione semantica che ogni annotatore desidera condurre, senza obbligarlo a produrre geometricamente tanti modelli di descrizione semantica differenti. Lo sfruttamento, poi, della corrispondenza esistente tra spazio tridimensionale e piano bidimensionale supporta la migrazione automatica di annotazioni tra diverse rappresentazioni tridimensionali dello stesso elemento architettonico (nuvola di punti, superficie poliedrica, nurbs, ecc.).

La possibilità, codificata dal modello proposto, di utilizzare gradienti, ha permesso di raffinare la qualità dell'annotazione e tramutare l'incertezza in risorsa. Con il gradiente, è possibile esprimere non solo una rilevanza binaria di ciascun vertice per un dato concetto ma anche un livello di rilevanza per lo stesso. In tal modo, il gradiente consente di focalizzare l'attenzione, e pertanto l'interesse, su quelle aree di una architettura per le quali non vi è una codificazione univoca. Si tratta di parti che enucleano la singolarità dell'elemento studiato, che il sistema quindi non cancella obbligando l'annotatore a una rigida classificazione ma, al contrario, evidenzia per stimolare approfondimenti e ricerche. Nella evidenza che la procedura di annotazione non può considerarsi esaustiva se effettuata da un unico esperto di dominio, laddove nel processo di conoscenza del patrimonio costruito, sono coinvolte più professionalità, il modello teorizzato consente, allora, di considerare le mappe semantiche prodotte da più annotatori, per ottenere una mappa finale calcolando i valori medi per ciascuna coordinata UV. Il processo è condotto calcolando il grado di accordo tra le annotazioni degli utenti, i quali nel processo di etichettatura sono liberi di applicare attribuzioni di significato incerte. Al sistema di mappatura semantica è demandata la codifica dell'incertezza, riconducendo la valutazione soggettiva ad una scala numerica ordinata.

La validità del modello è stata valutata mediante sessioni applicative di annotazione condotte da un campione di esperti di dominio su una selezione di concetti architettonici collegati ad un ambiente del caso di studio. La sperimentazione ha restituito dati che hanno supportato l'efficacia del sistema, dimostrando l'effettiva incertezza di annotazione tra gli utenti e le potenzialità informative di una documentazione che non costringe gli annotatori a classificazioni perentorie e definitive ma aperta al dibattito sulla multi significazione dell'architettura.

L'obiettivo conclusivo dello studio è stata l'analisi e selezione di un sistema informatico per il collegamento, l'archiviazione, la ricerca ed il recupero incrociato delle risorse annotate. Requisito del sistema è l'interpretabilità da parte di Intelligenze Artificiali, al fine di ottimizzare l'interoperabilità e lo scambio di conoscenza. Il modello proposto dalla ricerca si basa

sull'uso del codice ID numerico dell'AAT come chiave di collegamento di tutto il corpus documentativo. Ogni risorsa è annotata con l'ID semantico del tesaurus e archiviata in un database a grafo, Neo4j. La banca dati, caratterizzata da una strutturazione delle informazioni in nodi e relazioni cui sono collegate proprietà, si distingue per la capacità di incrociare un elevato numero di record, estraendo percorsi multi livello non banali. Il cuore della banca dati è rappresentato dal tesaurus tradotto in linguaggio Cypher, più espressivo delle triplette RDF, cui le risorse sono collegate e accessibili mediante nuovi sistemi di interrogazione incardinati nella rappresentazione tridimensionale dell'architettura. Ad oggi, la ricerca delle risorse annotate semanticamente e archiviate nelle banche dati è molto spesso strutturata con schemi non intuitivi per le persone che non hanno familiarità con il dominio di conoscenza specifico. Parole chiave o selezione di parti di modelli sono gli strumenti più impiegati per interrogare i database. Tuttavia, i termini di ricerca utilizzati dagli esperti sono spesso diversi dai termini utilizzati dall'utente comune, la cui profilazione può variare da un appassionato del settore a un estraneo del dominio di riferimento. Ne consegue che i non esperti consultano le risorse archiviate anche senza una conoscenza preliminare dell'oggetto o della terminologia specifica del dominio. La scelta della soluzione tecnologica per la raccolta e la condivisione delle risorse promossa dalla ricerca ha risposto, pertanto, al requisito aggiuntivo di rendere facile l'indicizzazione e il recupero dei metadati, supportando diversi tipi di ricerca sia da parte di non esperti che di utenti con esperienza. Accanto alla più tradizionale interrogazione mediante parole chiave e selezione di parti di modelli tramite periferiche come il mouse, il sistema impiegato supporta anche richieste in linguaggio naturale, in particolar modo attraverso gesti di puntamento. L'interpretazione dei gesti degli utenti è resa possibile dalla progettazione di una architettura di sistema in cui la rappresentazione digitale del manufatto architettonico è interrogabile in un applicativo software nato per il gaming, che supporta dispositivi di lettura del corpo come la kinect. Il modello architettonico digitale e l'interazione con lo stesso diventa in tal modo la chiave di accesso alla conoscenza.

La ricerca presentata ha fornito una metodologia di annotazione semantica, di rappresentazioni architettoniche digitali e relativo corpus documentativo, che risolve l'ambiguità e codifica l'incertezza di etichettatura, affinando la qualità dell'informazione. L'approccio codificato razionalizza e ottimizza il processo di annotazione, migliorando l'interoperabilità e l'interpretabilità delle risorse da parte di Intelligenze Artificiali. I punti di forza del sistema risiedono nella generazione di annotazioni tramite

interazione diretta con i modelli digitali, legando sempre più l'osservatore alla restituzione tridimensionale dell'architettura ed eliminando il filtro mediatore di supporti bidimensionali. Tale aspetto apre nuovi possibili scenari di ricerca, incentrati sull'approfondimento delle modalità di osservazione e annotazione di rappresentazioni tridimensionali, basate su una loro manipolazione attraverso il corpo.

Ciascun individuo si serve dei propri sensi per fare esperienza del mondo costruito e lo stesso corpo è *medium* del processo conoscitivo e interpretativo della spazialità osservata. L'azione di indicare, dinanzi ad uno spazio, reale o virtuale, enuclea una operazione critica di analisi e conoscenza di ciò che ci circonda. È un'operazione di discretizzazione dell'esistente in elementi puntuali cui è attribuito un valore, un significato, in cui il gesto del corpo diventa prolungamento di un pensiero logico. Indicare equivale quindi ad annotare.

Se ci si sofferma a riflettere sul ruolo che la corporalità assume nel processo interpretativo del costruito, si noterà che l'azione gestuale è preceduta dall'atto della visione. L'occhio è il filtro attraverso cui una prima ricognizione dello spazio è effettuata e da cui una selezione di discernimento è condotta, guidata da un ragionamento critico.

Un filone di ricerca futura potrà interessarsi della generazione di annotazioni, intese quali attribuzione di significazione a forme spaziali, a partire da gesti di puntamento e dal movimento degli occhi (alcuni studi embrionali, con altre finalità, sull'*eye tracking* sono già in corso). Le "mappe di interesse" che è possibile recuperare dal tracciamento della gestualità di occhi e arti, mettono a fuoco i principi di interazione ed analisi già codificati dalle mappe semantiche, altro punto di forza, teorizzato nello studio proposto.

La codificazione di mappe semantiche ha consentito di focalizzare la multi significazione dell'architettura, traducendo in immagine, in espressione visiva, l'astrazione concettuale che si accompagna alle forme geometriche. La mappatura semantica, pertanto, coniuga sia la necessità di raccogliere e registrare l'eterogenia di interpretazione di un episodio architettonico che il proposito di collegare linguaggi espressivi differenti (astrazione - spazio - visione).

La volontà di trasferire la dimensione del linguaggio, inteso in senso ampio come produzione verbale, concettuale e gestuale, alla dimensione spaziale costituisce il sostrato della ricerca su cui innestare altri scenari di sperimentazione. L'organizzazione di dati spaziali intorno a modelli di descrizione semantica definisce, di per sé, un primo livello di integrazione tra linguaggio - espresso nella dimensione delle parole che fissano concetti

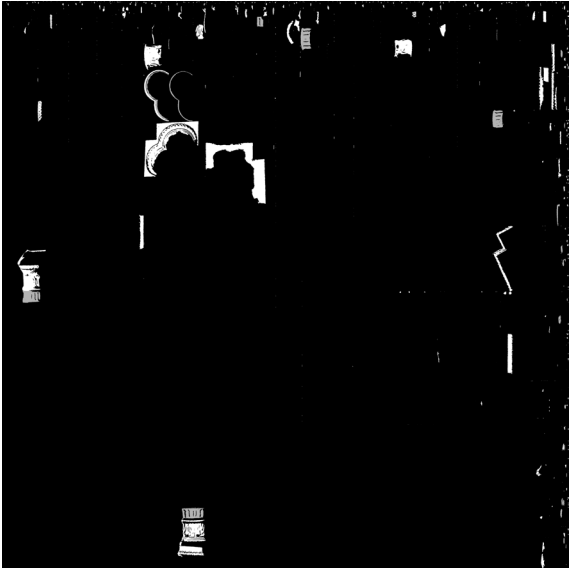
- e spazio. Integrazione che lo studio presentato ha ampliato strutturando un sistema di accesso, interrogazione e recupero delle informazioni che supporta e interpreta un altro tipo di linguaggio, quello specificamente corporeo. Alla gestualità, può accompagnarsi l'esplorazione delle possibilità offerte dall'interpretazione del parlato. La richiesta di informazioni su modelli digitali e documentazione collegata può avvenire attraverso la formulazione di domande in linguaggio naturale, in cui la richiesta è enunciata a voce. In tal modo, l'accessibilità al corpus informativo è aperta alle più disparate modalità di interazione con le rappresentazioni digitali, declinando il sistema di risposta in funzione della profilazione dell'utente.

In conclusione, la ricerca di modelli futuri che siano in grado di supportare l'interazione diretta di un osservatore/annotatore con la rappresentazione architettonica digitale, sia in fase di generazione delle informazioni che per il recupero delle risorse, definisce uno scenario in cui la conoscenza del reale raggiunge livelli di approfondimento maggiori. Il coinvolgimento non mediato dell'individuo con il modello digitale accresce la capacità interpretativa, la comprensione del valore e del significato laddove la conoscenza della rappresentazione è esperita con modalità non dissimili da quelle con le quali la stessa viene a generarsi nel mondo reale. La vicinanza con il modello virtuale innesca così processi di documentazione e divulgazione dei saperi resi virtuosi da una partecipazione sempre più attiva nella costruzione della conoscenza.

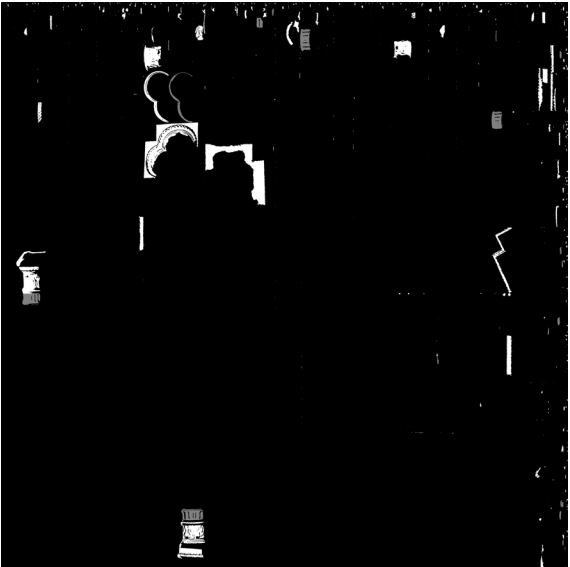
Appendice

Mappe semantiche ottenute dalle sessioni di annotazione con gli esperti di dominio

Concetto C04 “Capitello”



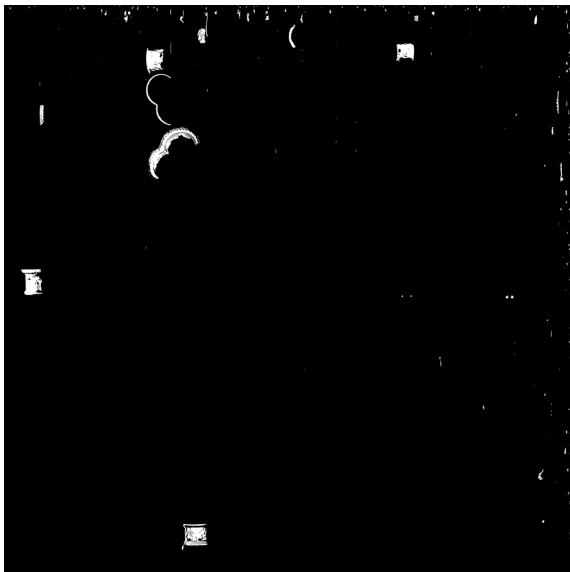
Ge1



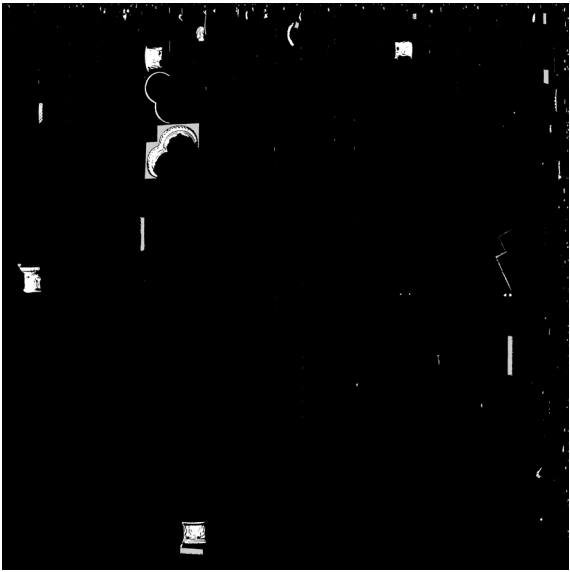
Ge2



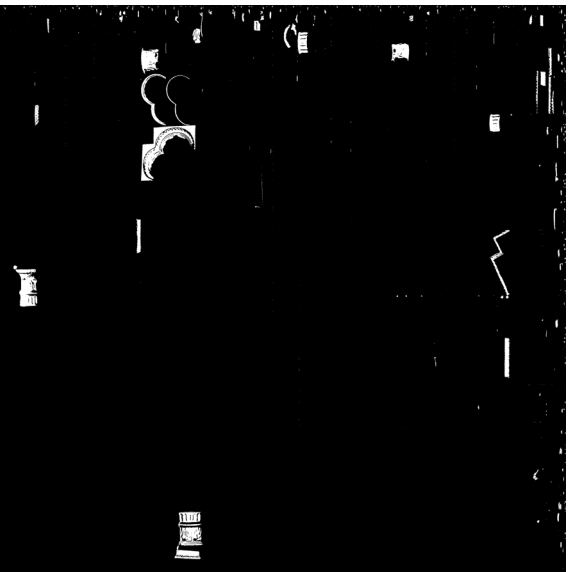
Pr1



Pr2



Ri1



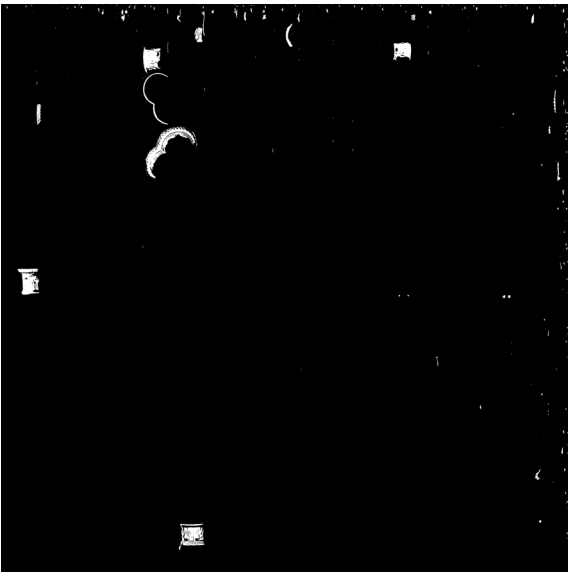
Ri2



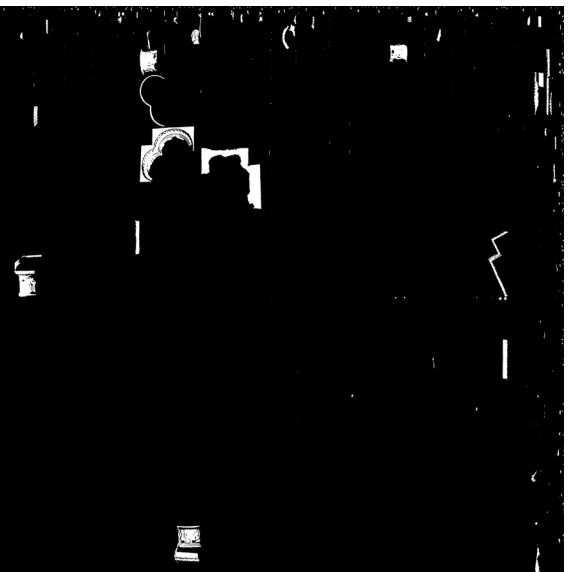
Re1



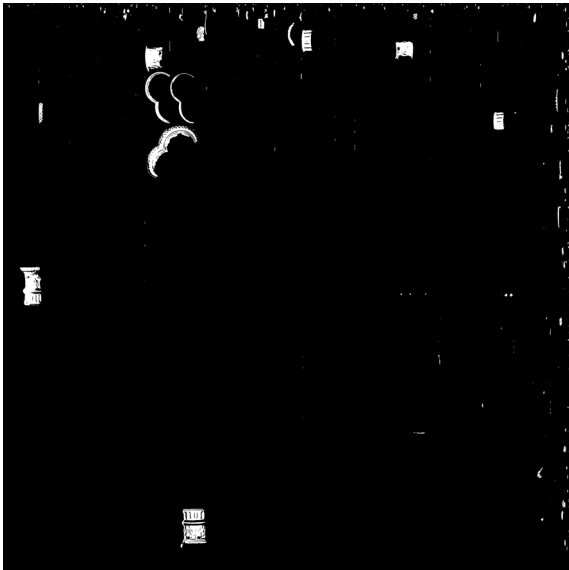
Re2



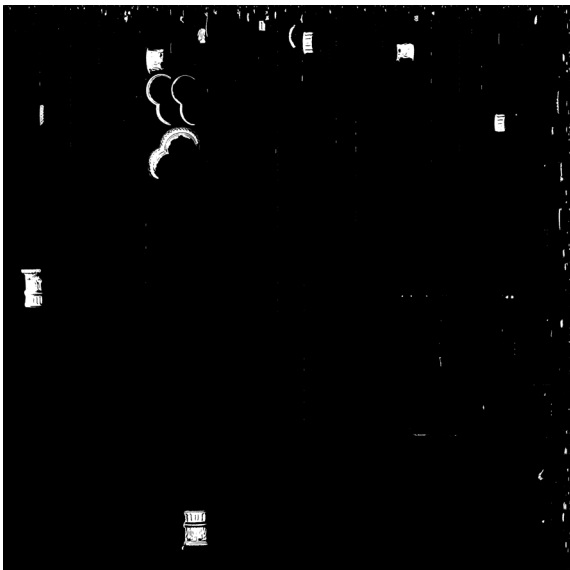
Sa1



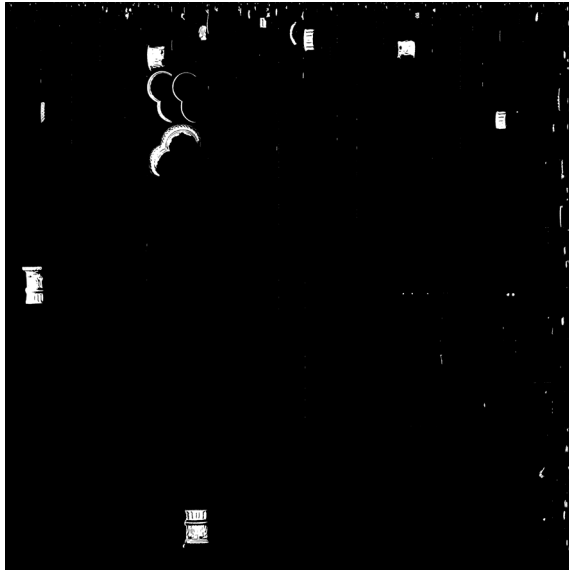
Sa2



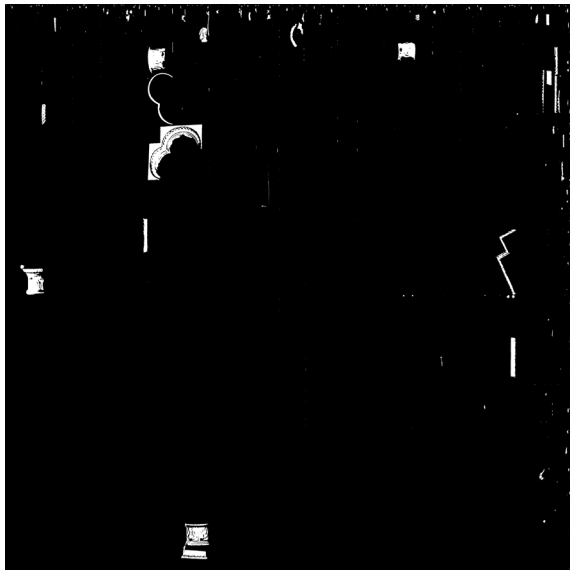
St1



St2



Te1



Te2



Mappa semantica finale, calcolata come media.

Stima del grado di accordo tra gli annotatori

	Ge1_C04_bmp	Ge2_C04_bmp	Pr1_C04_bmp	Pr2_C04_bmp	Re1_C04_bmp	Re2_C04_bmp	Ri1_C04_bmp	Ri2_C04_bmp	Sa1_C04_bmp	Sa2_C04_bmp	St1_C04_bmp	St2_C04_bmp	Te1_C04_bmp	Te2_C04_bmp
Ge1_C04_bmp	1,0000	0,9859	0,6434	0,6550	0,0175	0,2873	0,7705	0,8680	0,6543	0,9427	0,7012	0,7015	0,7090	0,8249
Ge2_C04_bmp	0,0000	1,0000	0,6502	0,6625	0,0188	0,2907	0,7790	0,8505	0,6605	0,9529	0,6840	0,6852	0,6851	0,8349
Pr1_C04_bmp	0,0000	0,0000	1,0000	0,4637	0,5276	0,6905	0,5467	0,5190	0,4627	0,6753	0,3816	0,3812	0,3858	0,5854
Pr2_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0163	0,0174	0,8854	0,7055	0,9921	0,6818	0,8279	0,8283	0,8375	0,7906
Re1_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,8835	0,0191	0,0230	0,0163	0,0110	0,0195	0,0196	0,0193	0,0205
Re2_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,1002	0,1513	0,0168	0,3059	0,0211	0,0208	0,0206	0,1753
Ri1_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,8297	0,8851	0,8034	0,7350	0,7359	0,7441	0,9311
Ri2_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,7038	0,7637	0,8274	0,8266	0,8352	0,8912
Sa1_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,6864	0,8247	0,8248	0,8340	0,7897
Sa2_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,5654	0,5654	0,5719	0,8582
St1_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,9919	0,9831	0,6593
St2_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,9893	0,6587
Te1_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,6661
Te2_C04_bmp	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Fonti delle immagini

Tutte le immagini, foto e disegni, non riportati all’interno di questo elenco sono da intendersi a cura dell’autore.

Capitolo Primo

1.1.1. Falcidieno, B., Attene, M., e Morra, M., “The Role of Semantics in Shape Modelling and Reasoning”, *Proceedings of the Israel-Italy bi-national conference on Shape Modeling and Reasoning for Industrial and Biomedical Applications*, 2007, Haifa, Israele (invited paper).

1.1.2. Jung, T., Gross, M. D., e Do, E. Y. L., “Annotating and sketching on 3D web models”, *Proceedings of the 7th international conference on Intelligent user interfaces*, 2002, ACM, San Francisco, California, USA, Pp. 95-102.

1.1.3. Bilasco, I. M., Gensel, J., Villanova-Oliver, M. e Martin, H., “3DSEAM: a model for annotating 3D scenes using MPEG-7”, *Multimedia, Seventh IEEE International Symposium*, 2005. IEEE.

1.1.4. Moccozet, L., “Spatialized tags for building 3D shapes folksonomies”, *Proceedings of the SAMT Workshop on Semantic 3D Media*, 2008, Koblenz, Germany. Pp. 45- 52.

1.1.5. Pittarello, F. e Gatto, I., “ToBoA-3D: an architecture for managing top-down and bottom-up annotated 3D objects and spaces on the web”, *Proceedings of the 16th International Conference on 3D Web Technology*, 2011, ACM, New York, USA. Pp. 57-65.

1.1.6. Philipp-Foliguet, S., Jordan, M., Najman, L. e Cousty, J., “Artwork 3D model database indexing and classification”, *Pattern Recognition*, 44(3), 2011, Elsevier, New York, USA. Pp. 588-597.

1.1.7. Koutsoudis, A., Stavroglou, K., Pavlidis, G. e Chamzas, C., “3DSSE – A 3D Scene Search Engine: Exploring 3D scenes using keywords”, *Journal of Cultural Heritage*, 12(2), 2012, Elsevier, New York, USA. Pp. 187-194.

1.1.8. Falcidieno, B., Giannini, F., Spagnuolo, M., Attene, M., Biasotti, S., Catalano, C., De Martino, M., Monti, M., Mortara, M., Pizzi, C., “Shape and Semantic Modelling”, *Archeomatica*, (3), 2016. Pp. 28-31.

1.1.9. Havemann, S., Settgast, V., Berndt, R., Eide, Ø. e Fellner, D. W., “The arrigo showcase reloaded-towards a sustainable link between 3D and semantics”, *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 2(1), 2009, ACM, New York, USA.

1.2.0. Echavarria, K. R., Morris, D., e Arnold, D., “Web based presentation of semantically tagged 3D content for public sculptures and monuments in the UK”, *Proceedings of the 14th International Conference on*

3D Web Technology, 2009, Darmstadt, Germany. ACM, New York, USA. Pp. 119-126.

1.2.1. Serna, S. P., Schmedt, H., Ritz, M. e Stork, A., “Interactive Semantic Enrichment of 3D Cultural Heritage Collections.”, *The 13th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, 2012. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland. Pp. 33-40.

1.2.2. Hunter, J. e Gerber, A., “Harvesting community annotations on 3D models of museum artefacts to enhance knowledge, discovery and re-use”, *Journal of Cultural Heritage*, 11(1), 2009. Elsevier, New York, USA. Pp. 81-90.

1.2.3. <http://www.v-must.net/mobility-blog/elzayat.mohamed>.

1.2.4. Pletinckx, D., *Deliverable of CARARE Grant Agreement number: 250445, Project Title: Connecting ARchaeology and ARchitecture in Europeana. D5.4 - 3D/VR Training materials, Revision: Final*, 09/10/2011.

1.2.5. Scalas, A., Mortara, M. e Spagnuolo, M., “ 3D Annotation Transfer”, *EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, 2017. Pp. 1-5.

1.2.6. <http://portal.ariadne-infrastructure.eu/>

1.2.7. Chih-Hao Yu, *Semantic Annotation Services for 3D Models of Cultural Heritage Artefacts*, Tesi di dottorato in Tecnologia delle Informazioni e Ingegneria Elettrica, Università di Queensland, Australia, 2014, disponibile presso <https://espace.library.uq.edu.au/>

1.2.8. e 1.2.9. Apollonio, F. I., Basilissi, V., Callieri, M., Dellepiane, M., Gaiani, M., Ponchio, F., Rizzo, F., Rubino, A. F., Scopigno, R. e Sobra', G., “A 3D-centered information system for the documentation of a complex restoration intervention”, *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 29. Pp. 89-99.

Capitolo Secondo

2.1.1. a 2.1.3. rielaborato da De Luca, L., “3D Modeling and Semantic Enrichment in Cultural Heritage”, *Marie Curie ITN DCH Summer School*, 2014.

2.1.4. De Luca, L., “3D Modeling and Semantic Enrichment in Cultural Heritage”, *Proceeding of the Photogrammetric Week’13*, 2013. Pp. 323-333.

2.1.6. Manuel, A., Stefani, C., De Luca, L., e Veron, P., “2D/3D semantic annotation towards a set of spatially-oriented photographs”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL (5/W2), 2013. Pp. 415-420.

2.1.8. Messaoudi, T., De Luca, L., Veron, L., “Towards an Ontology for Annotating Degradation Phenomena”, *Proceedings of Digital Heritage International Congress DH’15*, 2015. Pp.1-4.

2.1.9. <http://www.aioli.cloud/>

2.2.0. Garagnani, S. e Cinti Luciani, S., “Il modello parametrico in architettura: la tecnologia B.I.M. di Autodesk Revit”, 2011a, *DisegnareCon*, 6, Pp. 20-29.

2.2.1. Raimondi, A. e Ripoli, F., “La casa albero di Perugini - il BIM ante litteram”, *Building Information Modeling, Data & Semantics*, 1, 2017. Pp. 54-68.

2.2.2. Paris, L. e Wahbeh, W., “Rilievo e rappresentazione delle geometrie parametriche per l’HBIM”, *DisegnareCon*, 9(16), 2016. Pp. 12.1-12.9.

Capitolo Terzo

3.1.1. Ogden, C.K. e Richards, I.A., *The Meaning of Meaning*, Harcourt, Brace & World, Inc., New York, 1923.

3.1.5. Messaoudi, T., *Proposition d’une ontologie de domaine dédiée à l’annotation d’images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti*, Tesi di Dottorato in Conception École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers - ENSAM, 2017.

3.1.6. e 3.1.7. rielaborato da Laurini, R., *Architettura dei Database Territoriali*, <https://perso.liris.cnrs.fr/robert.laurini/iauav-pdf/I-1.pdf>

3.1.8. e 3.2.0. De Luca, L., *Relevè e et multi-représentations du patrimoine architectural Définition d’une approche hybride pour la reconstruction 3D d’edices*, Tesi di Dottorato in Conception, Sciences de l’Homme et Socièetèe, Arts et Metiers, École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Centre d’Aix-en-provence, 2006.

3.2.1. Koutsomitropoulos, D. A., Solomou, G. D. e Papatheodorou, T. S., “Metadata and Semantics in Digital Object Collections: A Case-Study on CIDOC-CRM and Dublin Core and a Prototype Implementation”, *Journal of Digital Information*, 10 (6). 2009.

3.2.2. rielaborato da <http://www.ariadne-infrastructure.eu/Resources/Ariadne-Reference-Model>

Capitolo Quarto

4.1.1. rielaborato da Remondino, F. e Campana, S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and Best Practice*, BAR International Series 2598, 2014.

4.1.2. Remondino, F. e Campana, S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and Best Practice*, BAR International Series 2598, 2014.

4.1.3. Bawden, G., Howle, J., Bond, S., Shriro, M e Buck P., “ Three-Dimensional Imaging, Change Detection, and Stability Assessment during the Centerline Trench Levee Seepage Experiment Using Terrestrial Light Detection and Ranging Technology, Twitchell Island, California, 2012”, *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1092*, 28 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141092>.

4.1.4. Remondino, F. e Campana, S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and Best Practice*, BAR International Series 2598, 2014.

4.1.5. Mauri, S., “Make your scan. Rilievo 3D di oggetti tramite uno scanner progettato con componenti open source”. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Facoltà di Design, anno accademico 2012/2013.

4.1.6. Mauri, S., “Make your scan. Rilievo 3D di oggetti tramite uno scanner progettato con componenti open source”. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Facoltà di Design, anno accademico 2012/2013.

4.1.7. https://it.wikipedia.org/wiki/Diagramma_di_Voronoi

4.1.8. <http://www.scienzainrete.it/contenuto/articolo/numeri-della-natura>

4.1.9. Remondino, F. e Campana, S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and Best Practice*, BAR International Series 2598, 2014.

4.2.0. e 4.2.1. Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. e Harley I., *Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications*. Whittles Publishing,2011.

4.2.2. Remondino, F. e Campana, S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and Best Practice*, BAR International Series 2598, 2014.

4.2.3. a 4.2.6. De Luca, L., *La fotomodellazione architettonica*, Dario Flaccovio Editore, 2011.

4.2.7. e 4.2.8. Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. e Harley I., *Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications*. Whittles Publishing,2011.

Capitolo Quinto

5.1.1. Arvo, J., Euranto, A., Järvenpää, L., Lehtonen, T. e Knuutila, T., *3D mesh simplification. A survey of algorithms and CAD model simplification tests*, University of Turku Technical Reports, 2015, 3.

5.1.2. e 5.1.3. Luebke, D. P. e Erikson, C., “View-Dependent Simplification of Arbitrary Polygonal Environments,” *Computer Graphics (Proc. Siggraph 97)*, 1997, 31. Pp. 199-208.

5.1.4. e 5.1.5. rielaborato da Luebke, D. P. e Erikson, C., “View-Dependent Simplification of Arbitrary Polygonal Environments,” *Computer Graphics (Proc. Siggraph 97)*, 1997, 31. Pp. 199-208.

5.1.6. e 5.1.7. Arvo, J., Euranto, A., Järvenpää, L., Lehtonen, T. e Knuutila, T., *3D mesh simplification. A survey of algorithms and CAD model simplification tests*, University of Turku Technical Reports, 2015, 3.

5.1.8. Attene, M., *Algoritmi per la semplificazione di griglie di triangoli*, Relazione di approfondimento per il corso di Modellazione Geometrica, Università degli studi di Genova.

5.1.9. a 5.2.2. Arvo, J., Euranto, A., Järvenpää, L., Lehtonen, T. e Knuutila, T., *3D mesh simplification. A survey of algorithms and CAD model simplification tests*, University of Turku Technical Reports, 2015, 3.

5.2.3. a 5.2.7. Garone, G., *Retopology di Modelli 3D Studio Applicativo per il Cultural Heritage*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione, Politecnico di Torino, 2017.

5.2.8. Dalli Cardillo, G., *Sistemi di raPpresentazione ed anastilosi virtuale del tempio di Castore e Polluce di Agrigento*, Tesi

di dottorato in Rilievo e RaPpresentazione, Università degli Studi di Palermo, 2011.

5.2.9. a 5.3.2. rielaborato da Garone, G., *Retopology di Modelli 3D Studio Applicativo per il Cultural Heritage*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria del Cinema e dei Mezzi di Comunicazione, Politecnico di Torino, 2017.

5.3.3. rielaborato da <http://www.semantic3d.net/>

5.3.4. e 5.3.5. Grilli, E., Menna, F. e Remondino, F., “A review of point clouds segmentation and classification algorithms”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-2/W3. Pp. 339-344.

5.3.6. Xiaohu, L., Yao, J., Tu, J., Li, K., LI, L. e Liu, Y., “Pairwise Linkage for point cloud segmentation”, *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, III-3. Pp. 201-208.

Capitolo Sesto

6.1.6. <https://neo4j.com/developer/graph-db-vs-rdbms/>

6.1.8. a 6.2.1. <https://neo4j.com/blog/rdf-triple-store-vs-labeled-property-graph-difference/>

Capitolo Settimo

7.1.1. https://it.wikipedia.org/wiki/Ordine_certosino

7.1.5., 7.1.6. e 7.1.9. Di Stefano, R., *La Certosa di San Giacomo a Capri*, Edizione Scientifiche Italiane, 1982.

7.2.0. Catalogo *Il cammino delle certose*, arte’m, 2018.

7.2.1. e 7.2.2. de Cunzo, M. e de Martini, V., *La Certosa di Padula*, Soprintendenza per i Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici di Salerno e Avellino, 2006.

7.2.4. a 7.2.8. Catalogo *Il cammino delle certose*, arte’m, 2018.

Capitolo Ottavo

8.1.5., 8.1.6. e 8.4.0 rielaborato da Nitto, M. T., *La Cittadella monastica della Certosa di San Lorenzo a Padula: Ordine e misura dei chiostri minori*, Tesi di Laura Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Relatore prof. arch. Massimiliano Campi, Correlatore arch. Valeria Cera, 2017.

8.4.2. rielaborato da Falcone, M., *La Casa Bassa tra rilievo e conoscenza. La Certosa di San Lorenzo a Pasula*, Tesi di Laura Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Relatore prof. arch. Massimiliano Campi, Correlatore arch. Valeria Cera, 2018.

Capitolo Undicesimo

11.1.1. a 11.1.6. Grazioso, M., *Interazione naturale in ambienti 3D annotati semanticamente*, tesi di laurea magistrale in Informatica, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell’Informazione, Università degli Studi di Federico II, 2018.

11.1.9. e 11.2.2. <https://neo4j.com/blog/rdf-triple-store-vs-labeled-property-graph-difference/>

11.2.4. Grazioso, M., *Interazione naturale in ambienti 3D annotati semanticamente*, tesi di laurea magistrale in Informatica, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell’Informazione, Università degli Studi di Federico II, 2018.

11.2.6. e 11.2.7. Grazioso, M., *Interazione naturale in ambienti 3D annotati semanticamente*, tesi di laurea magistrale in Informatica, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell’Informazione, Università degli Studi di Federico II, 2018.

Bibliografia

RICERCA E SPERIMENTAZIONE DI MODELLI DI ARRICCHIMENTO SEMANTICO DI GEOMETRIE TRIDIMENSIONALI

La ricerca per l’annotazione semantica di modelli tridimensionali del patrimonio culturale

Articoli

- Abbott, D., Bale, K., Gowigati, R., Pritchard, D. e Chapman, P., “Empire 3D: A Collaborative Semantic Annotation Tool for Virtual Environments”, *Proceeding of The 2011 World Congress in Computer Science, Computer Engineering, and APplied Computing (WORLDCOMP 2011)*, 2011. CSREA Press, USA. Pp. 47-52.
- Adobe, “Multimedia and 3D Models”, *Using Adobe Acrobat X Standard*. 2011, Adobe Systems Incorporated, San Jose, California, USA. Pp. 299-316.
- Albertoni, R., Papaleo, L., Pitikakis, M., Robbiano, F., Spagnuolo, M. e Vasilakis, G., “Ontology-Based Searching Framework for Digital Shapes.”, *On the Move to Meaningful Internet Systems 2005: OTM 2005 Workshops*, 2005. LNCS Series, Springer Berlin Heidelberg, Germany. Pp. 896-905.
- Apollonio, F. I., Basilissi, V., Callieri, M., Dellepiane, M., Gaiani, M., Ponchio, F., Rizzo, F., Rubino, A. F., Scopigno, R. e Sobra’, G., “A 3D-centered information system for the documentation of a complex restoration intervention”, *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 29. Pp. 89-99.
- Attene, M., Spagnuolo, M., e Falcidieno, B., “Hierarchical Mesh Segmentation based on Fitting Primitives”, *The Visual Computer*, 22(3), 2006. Pp. 181-193.
- Attene, M., Robbiano, F., Spagnuolo, M., e Falcidieno, B., “Part-based Annotation of Virtual 3D Shapes”, *Proceedings of Cyberworlds 2007*, Special session on the NASAGEM workshop, 2007, Hannover, Germania.
- Attene, M., Robbiano, F., Spagnuolo, M., e Falcidieno, B., “Semantic Annotation of 3D Surface Meshes based on Feature Characterization”, *Lecture Notes on Computer Science, SAMT 2007 Conference Proceedings*, 2007, Genova, Italia. Pp. 126-139.
- Bilasco, I. M., Gensel, J., Villanova-Oliver, M. e Martin, H., “3DSEAM: a model for annotating 3D scenes using MPEG-7”, *Multimedia, Seventh IEEE International Symposium*, 2005. IEEE.
- Binding, C. e Tudhope, D., “Improving interoperability using vocabulary linked data, *International Journal on Digital Libraries*, 2016, 17(1), Pp. 5-21.
- Catalano, C. E., Falcidieno, B., Attene, M., Robbiano, F., e Spagnuolo, M., “Shape Knowledge Annotation for Virtual Product Sharing and Reuse”, *Proceedings of the ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA08*, 2008, Haifa, Israele.

- Cohen-Steiner, D., Alliez, P., e Desbrun, M., “Variational Shape APproximation”, *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), 2004. Pp. 905-914.
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F. e Ranzuglia, G., “MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool”, *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*, 2008. Pp. 129-136.
- D’Andrea, A., Niccolucci, F., Bassett, S. and Fernie, K., “3D-ICONS: World Heritage sites for Europeana: Making complex 3D models available to everyone”, *Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*, 2012. IEEE. Pp. 517-520.
- Doerr, M., “The CIDOC Conceptual Reference Module: An Ontological APproach to Semantic Interoperability of Metadata”, *AI Magazine*, 24 (3). 2003. Pp. 75-92.
- Doerr, M., “Ontologies for Cultural Heritage”, *Handbook on Ontologies*, a cura di Steffen Staab e Rudi Studer, International Handbooks on Information Systems, Springer Berlin Heidelberg, 2009. Pp. 463-486.
- Doerr, M., Tzompanaki, K., Theodoridou, M., Georgis, CH., Axaridou, A. e Havemann, S., “A repository for 3D model production and interpretation in culture and beyond.”, *Proceedings of the 11th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, 2010, Paris, France. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland. Pp. 97-104.
- Eastman, C., “An Outline of the Building Description System”, *Research report. Institute of Physical Planning*, 50, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, 1974.
- Echavarria, K. R., Morris, D., e Arnold, D., “Web based presentation of semantically tagged 3D content for public sculptures and monuments in the UK”, *Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology*, 2009, Darmstadt, Germany. ACM, New York, USA. Pp. 119-126.
- Echavarria, K. R., Theodoridou, M., Georgis, C., Arnold, D. B., Doerr, M., Stork, A. e Serna S. P., “Semantically rich 3D documentation for the preservation of tangible heritage”, *VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, 2012, Eurographics Association. Pp. 41-48.
- El-Zayat, M., “3D floating annotations”, 2013, V-Must.net. Disponibile presso: <http://www.v-must.net/mobility-blog/elzayat.mohamed>.
- Europeana Professional, “Europeana Professional - New ways of searching and browsing: Europeana 4D and Assets 3D search.”, 2014. Disponibile presso: <http://pro.europeana.eu/web/guest/thoughtlab/new-ways-of-searching-and-browsing>
- Falcidieno, B., Attene, M., e Morra, M., “The Role of Semantics in Shape Modelling and Reasoning”, *Proceedings of the Israel-Italy bi-national conference on Shape Modeling and Reasoning for Industrial and Biomedical APplications*, 2007, Haifa, Israele (invited paper).
- Falcidieno, B., Giannini, F., Spagnuolo, M., Attene, M., Biasotti, S., Catalano, C., De Martino, M., Monti, M., Mortara, M., Pizzi, C., “Shape and Semantic Modelling”, *Archeomatica*, (3), 2016. Pp. 28-31.
- Gonizzi Barsanti, S., Guidi, G., De Luca, L., “Segmentation of 3d models for cultural heritage structural analysis – some critical issues”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV(2/W2), 2017.
- Guarnieri, A., Pirotti, F., e Vettore, A., “Cultural heritage interactive 3D models on the web: An aPproach using open source and free software”, *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 2010. Elsevier, New York, USA. Pp. 350-353.

- Goldfeder, C. e Allen, P., “Autotagging to improve text search for 3D models”, *Proceedings of the 8th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries*, 2008, Pittsburgh, PA, USA. ACM, New York, USA. Pp. 355-358.
- Havemann, S., Settgest, V., Berndt, R., Eide, Ø. e Fellner, D. W., “The arrigo showcase reloaded—towards a sustainable link between 3D and semantics”, *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 2(1), 2009, ACM, New York, USA.
- Hetherington, R., Farrimond, B., e Presland, S., “Information rich temporal virtual models using X3D”, *Computers & Graphics*, 30(2), 2006. Pp. 287-298.
- Hunter, J., “Combining the CIDOC CRM and MPEG-7 to Describe Multimedia in Museums”, *Proceedings of the Museums and the Web international conference*, 2002. Archives and Museum Informatics, Boston, Massachusetts, USA.
- Hunter, J., Schroeter, R., Koopman, B. e Henderson, M., “Using the semantic grid to build bridges between museums and indigenous communities”, *Proceedings of the GGF11-Semantic Grid APplications Workshop*, 2004, Honolulu, Hawaii, USA.
- Hunter, J. E Little, S., “A framework to enable the semantic inferencing and querying of multimedia content”, *International Journal of Web Engineering and Technology*, 2(2/3), 2005. Inderscience Publishers, Olney, Bucks, UK. Pp. 264-286.
- Hunter, J., Henderson, M., e Khan, I., “Collaborative annotation of 3D crystallographic models”, *Journal of Chemical Information And Modeling*, 47(6), 2007, American Chemical Society, USA. Pp. 2475-2484.
- Hunter, J. e Gerber, A., “Harvesting community annotations on 3D models of museum artefacts to enhance knowledge, discovery and re-use”, *Journal of Cultural Heritage*, 11(1), 2009. Elsevier, New York, USA. Pp. 81-90.
- Hunter, J. e Yu, C. H., “Supporting Multiple Perspectives on 3D Museum Artefacts through Interoperable Annotations”, *Cultural Computing*, 2010, Brisbane, Australia. IFIP Series, Springer Berlin Heidelberg, Germany. Pp. 149-159.
- Hunter, J. E Yu, C. H., “Assessing the Value of Semantic Annotation Services for 3D Museum Artefacts”, *Sustainable Data from Digital Research Conference (SDDR 2011)*, 2011, Melbourne. Pp. 137-157.
- Jung, T., Do, E. Y. L., e Gross, M. D., “Immersive redlining and annotation of 3D design models on the Web”, *8th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*, 1999, Georgia, Atlanta. Kluwer Scientific Publishers. Pp. 81-98.
- Jung, T., Gross, M. D., e Do, E. Y. L., “Sketching annotations in a 3D web environment”, *CHI '02 extended abstracts on Human factors in computing systems*, 2002, ACM, Minneapolis, Minnesota, USA. Pp. 618-619.
- Jung, T., Gross, M. D., e Do, E. Y. L., “Annotating and sketching on 3D web models”, *Proceedings of the 7th international conference on Intelligent user interfaces*, 2002, ACM, San Francisco, California, USA, Pp. 95-102.
- Kadobayashi, R., Lombardi, J., Mccahill, M. P., Stearns, H., Tanaka, K. e Kay, A., “3D Model Annotation from Multiple Viewpoints for Croquet”, *The Fourth International Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing*, 2006. C5 '06, 2006, Berkeley, CA. Pp.10-15.
- Koutsoudis, A., Stavroglou, K., Pavlidis, G. e Chamzas, C., “3DSSE – A 3D Scene Search Engine: Exploring 3D scenes using keywords”, *Journal of Cultural Heritage*, 12(2), 2012, Elsevier, New York, USA. Pp. 187-194.

- Masci, M. E., De Santis, A., Fernie, K. e Pletinckx, D., “3D in the CARARE project: Providing Europeana with 3D content for the archaeological and architectural heritage: The Pompeii case study”, *Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*, 2012. IEEE. Pp 227-234.
- Michaelis, N., Jung, Y., e Behr, J., “Virtual heritage to go”, *Proceedings of the 17th International Conference on 3D Web Technology*, 2012. ACM, New York, USA. Pp. 113-116.
- Moccozet, L., “Spatialized tags for building 3D shapes folksonomies”, *Proceedings of the SAMT Workshop on Semantic 3D Media*, 2008, Koblenz, Germany. Pp. 45- 52.
- Mortara, M., Patané, G., Spagnuolo, M., Falcidieno, B., e Rossignac, J., “Plumber: A method for a multi-scale decomposition of 3d shapes into tubular primitives and bodies”, *Proceedings Of ACM Solid Modeling*, 2004. Pp. 339-344.
- Peng, H., Long, F., e Myers, E. W., “Vano: a volume-object image annotation system”, *Bioinformatics*, 25 (5), 2009. Oxford Open, Oxford, UK. Pp. 695-697.
- Philipp-Foliguet, S., Jordan, M., Najman, L. e Cousty, J., “Artwork 3D model database indexing and classification”, *Pattern Recognition*, 44(3), 2011, Elsevier, New York, USA. Pp. 588-597.
- Pittarello, F. e Gatto, I., “ToBoA-3D: an architecture for managing top-down and bottom-up annotated 3D objects and spaces on the web”, *Proceedings of the 16th International Conference on 3D Web Technology*, 2011, ACM, New York, USA. Pp. 57-65.
- Pitzalis, D., Kaminski, J., e Niccolucci, F., “3D-COFORM: Making 3D documentation an everyday choice for the cultural heritage sector.”, *Virtual Archaeology Review*, 2011. SEAV, 2(4), Pp. 145-146.
- Ponchio, F., Potenziani, M., Dellepiane, M., Callieri, M. e Scopigno, R., “ARIADNE Visual Media Service: Easy Web Publishing of Advanced Visual Media”, *CA42015*, 2016, 1, Pp. 433-442.
- Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., Ponchio, F. e Scopigno, R., “3DHOP: 3D Heritage Online Presenter”, *Computer & Graphics*, 2015, 52, Pp. 129-141.
- Scalas, A., Mortara, M. e Spagnuolo, M., “ 3D Annotation Transfer”, *EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, 2017. Pp. 1-5.
- Serna, S. P., Scopigno, R., Doerr, M., Theodoridou, M., Georgis, C., Ponchio, F. e Stork, A., “3D-centered media linking and semantic enrichment through integrated searching, browsing, viewing and annotating”, *Proceedings of the 12th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, 2011. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland. Pp. 89-96.
- Serna, S. P., Schmedt, H., Ritz, M. e Stork, A., “Interactive Semantic Enrichment of 3D Cultural Heritage Collections.”, *The 13th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, 2012. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland. Pp. 33-40.
- Yu, C. H., “Semantic Annotation of 3D Digital Representation of Cultural Artefacts”, *Bulletin of IEEE Technical Committee on Digital Libraries* (TCDL), 2010, 6(2).
- Yu, C. H., Groza, T. e Hunter, J., “High Speed Capture, Retrieval and Rendering of Segment-Based Annotations of 3D Museum Objects”, *Digital Libraries: For Cultural Heritage, Knowledge Dissemination, and Future Creation*, 2011. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer Berlin / Heidelberg, 2011, 7008. Pp. 5-15.
- Yu, C. H., Groza, T. e Hunter, J., “Reasoning on Crowd-sourced Semantic Annotations to Facilitate

Cataloguing of 3D Artefacts in the Cultural Heritage Domain”, *International Semantic Web Conference 2* (ISWC), 2013. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Springer Berlin / Heidelberg, 8219. Pp. 228-243.

- Yu, C. H. e Hunter, J., “Documenting and Sharing Comparative Analyses of 3D Digital Museum Artifacts through Semantic Web Annotations”, *Journal of Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 2013,6 (4).

La ricerca in architettura per la strutturazione di manufatti digitali intorno a modelli di descrizione semantica

Testi

- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., “*BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*”, John Wiley & Sons Inc, seconda edizione, 2011.

Articoli

- Apollonio, F. I., Gaiani, M. e Sun, Z., “BIM-based modeling and data enrichment of classical architectural buildings”, *SCIRES-IT*, 2012, 2(2).
- Bianchini, C., Inglese, C. e Ippolito, A., “Il contributo della RaPpresentazione nel Building Information Modeling (BIM) per la gestione del costruito”, *DisegnareCon*, 2016, 9(16).
- De Luca, L., Véron, P., e Florenzano, M., “Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling aPproach”, *Computers & Graphics*, 30(2), 2006. Pp. 160-176.
- De Luca, L., Busayarat, C., Stefani, C., Véron, P., e Florenzano, M., “NUBES: une plateforme intégrée pour la description, l’analyse, la documentation et le partage de représentations numériques d’édifices architecturaux”, *Colloque européen Architecture et archives numériques natives*, 2007, PARIS, Francia. Pp. 472-503.
- De Luca, L., Véron, P., e Florenzano, M., “A generic formalism for the semantic modeling and representation of architetur al elements”, *The Visual Computer*, 23(3), 2007. Pp.181-205.
- De Luca, L., Busayarat, C., Stefani, C., Renaudin, N., Florenzano, M., e Véron, P.,” An Iconography-Based Modeling A Pproach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage”, *Shape Modeling International Conference*, 2010. Pp. 78-89.
- De Luca, L., “Verso la caratterizzazione semantica di raPpresentazioni digitali di artefatti architetonici: linee programmatiche di ricerca”, *DisegnareCon*, “Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale”, 2011. Pp. 99-106.
- De Luca, L., Busayarat J., Stefani C., Véron P., Florenzano M., “A semantic-based platform for the digital analysis of the architectural heritage”, *Computer & Graphics*, 35(2), 2011. Pp. 227-241.
- De Luca, L., “3D Modeling and Semantic Enrichment in Cultural Heritage”, *Proceeding of the Photogrammetric Week’13*, 2013. Pp. 323-333.
- Dore, C., Murphy, M., “Integration of Historic Building Information Modeling and 3D GIS for Recording and Managing Cultural Heritage Sites”, *18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia: “Virtual Systems in the Information Society”*, 2012, Milan, Italy, Pp. 369-376.

- Eastman, C., “An Outline of the Building Description System”, *Research report. Institute of Physical Planning*, 1974, 50, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.
- Edgar, A., Smith, D., *Building Information Modeling (BIM)*, 2008. <http://www.wbdg.org/bim/bim.php>.
- Fai, S., Graham, K., Duckworth, T., Wood, N., Attar, R., “Building Information Modelling and Heritage Documentation”, *XXIII CIPA International Symposium*, Prague, Czech Republic, 2011, <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/047>.
- Gaiani, M., Benedetti, B., Apollonio, F. I., “Standard di acquisizione e strutturazione di modelli digitali per sistemi informativi di aree archeologiche: il caso di Pompei”, *DISEGNARE IDEE IMMAGINI*, 2009, 39. Pp. 60-73.
- Garagnani, S. e Cinti Luciani, S., “Il modello parametrico in architettura: la tecnologia B.I.M. di Autodesk Revit”, 2011a, *DisegnareCon*, 6, Pp. 20-29.
- Garagnani, S., Cinti Luciani, S. e Mingucci, R., “Building Information Modeling: la tecnologia digitale al servizio del progetto di architettura”, 2011b, *DisegnareCon*, 6. Pp. 5-19.
- Garagnani, S., “Building Information Modeling semantico e rilievi ad alta risoluzione di siti appartenenti al Patrimonio Culturale”, 2012, *DisegnareCon*, *Doco 2012 Documentazione e Conservazione del Patrimonio Architettonico ed Urbano*, Pp. 297-302.
- Garagnani, S., Manferdini, A. M., “Parametric accuracy: Building Information Modeling process applied to the cultural heritage preservation”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XL-5/W1.
- Goulette, JP., “Sémantique formelle de l'espace: Application au raisonnement spatial qualitatif en architecture”, *Intellectica: Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, (29), 1999. Pp. 9-34.
- Grussenmeyer, P., Koehl, M., e Nour El Din, M., “3D geometric and semantic modelling in historic sites”, *XVII CIPA International Symposium*, 1999.
- Heine, E., “High precision building documentation: Element definition and data structuring”, *Proceedings of The ICOMOS & ISPRS Committee for the Documentation of Cultural Heritage*, Working Group II, Recife/ Brazil, 1999.
- Incerti, M., e Iurilli, S., “From Survey data to virtual environment. Two case studies”, *SCientific RESearch and Information Technology*, 4(2), 2014. Pp. 87-108.
- Jardim-Goncalves, R., Grilo, A., “Building information modeling and interoperability”, *Automation in Construction*, 2010, 19(4). Pp. 367-387.
- Kadobayashi, R., e Tanaka, K., “3D viewpoint-based photo search and information browsing”, *SIGIR*, 2005. Pp. 621-622.
- Kadobayashi, R., Lombardi, J., Mccahill, M. P., Stearns, H., Tanaka, K. e Kay, A., “3D Model Annotation from Multiple Viewpoints for Croquet”, *The Fourth International Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing*, 2006. *C5 '06*, 2006, Berkeley, CA. Pp.10-15.
- Lee, S. C., Jung, S. K., e Nevatia, R., “Automatic pose estimation of complex 3D building models”, *IEEE Workshop on Application of Computer Vision*, 1992. Pp. 148-152.
- MadseN, J.B., e Madsen, C.B., “Handheld Visual Representation of a Castle Chapel Ruin”, *ACM Journal*

on Computing and Cultural Heritage, 9(1), 2015. Pp. 1-18.

- Manferdini, A.M., Remondino, F., Baldassini, S., Gaiani, M., e Benedetti, B., “3D Modeling and semantic classification of archaeological finds for management and visualization in 3D archaeological databases”, *Proceedings at the 14th VSMM Conference*, Limassol, Cyprus, 2008.
- Manuel, A., Stefani, C., De Luca, L., e Veron, P., “2D/3D semantic annotation towards a set of spatially-oriented photographs”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL (5/W2), 2013. Pp. 415-420.
- Manuel, A., De Luca, L., e Veron, P., “A Hybrid Approach for the Semantic Annotation of Spatially Oriented Images”, *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(2), 2014. Pp.305-320.
- Messaoudi, T., De Luca, L., Veron, L., “Towards an Ontology for Annotating Degradation Phenomena”, *Proceedings of Digital Heritage International Congress DH'15*, 2015. Pp.1-4.
- Mingucci, R., “La comunicazione del progetto nell’era digitale”, *DisegnareCon*, 2008, 1(1).
- Moscati, A., “Sistemi Informativi Integrati”, *DisegnareCon*, numero speciale DOCO 2012 “Documentazione e conservazione del patrimonio architettonico ed urbano”, 2012. Pp. 249-254.
- Nespeca R., e De Luca L., “Analysis, thematic maps and data mining from point cloud to ontology for software development”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 2016. Pp. 347-354
- Pierrot-Deseilligny, M., e Clery, I., “APERIO, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5/W16), 2011.
- Tsai, R., “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision”, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1986. Pp. 364-374.
- Saygi, G. e Remondino, F., “Management of Architectural Heritage Information in BIM and GIS: State-of-the-art and Future Perspectives”, *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2013, 2(4), Pp. 695-713.
- Snavely, N., Seitz, S., e Szeliski, R., “Photo Tourism: Exploring image collections in 3D”, *SIGGRAPH*, 2006.
- Snavely, N., Seitz, S., e Szeliski, R., “Modeling the World from Internet Photo Collections”, *International Journal of Computer Vision*, 2007.
- Stefani, C., De Luca, L., Véron, P., e Florenzano, M., “Reasoning about space-time changes: an approach for modeling the temporal dimension in architectural heritage”, *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Visualization*, 2008, Amsterdam, Netherlands.
- Stefani, C., De Luca, L., Véron, P., e Florenzano, M., “A Tool for the 3D Spatio-Temporal Structuring of Historic Building Reconstructions”, *Digital Media and its Applications in Cultural Heritage*, 2011. Pp. 153-168.
- Stefani, C., Busayarat, C., Lombardo, J., e DE LUCA, L., “A database of spatialized and semantically-enriched iconographic sources for the documentation of cultural heritage buildings”, *Proceedings of IEEE VSMM 2012 - 18th International Conference on Virtual System and Multimedia*, 2012.
- Stefani, C., Busayarat, C., Lombardo, J., De Luc A, L., e Véron, P., “A Web Platform for the Consultation

of Spatialized and Semantically-Enriched Iconographic Sources on Cultural Heritage Buildings”, *Journal on Computing and Cultural Heritage*, Association for Computing Machinery, 6(3), 2013.

- Waldhäusl, P., e Ogleby, C., “3 x 3 Rules for simple photogrammetric documentation of architecture”, *I.J.G.Fryer*, 1994. Pp. 426-429.
- Yajing, D. e Cong W., “Research on the Building Information Model of the stone building for heritages conservation with the outer south gate of the Ta Keo Temple as an example, *Proc. Int. Conference on Electric Technology and Civil Engineering* (ICETCE), 2011, Pp. 1488-1491.

QUESTIONI TEORICHE E METODOLOGICHE IMPLICATE NEL PROCESSO DI ANNOTAZIONE SEMANTICA DI MODELLI ARCHITETTONICI

Temi, formalismi e modelli per una lettura semantica dell’architettura nel sistema del web semantico

Testi

- Eco, U., *Trattato di semiotica generale*, Bompiani, Milano, 1975.
- Gros, P., *L’architettura romana: dagli inizi del III secolo a.C. alla fine dell’alto impero*, Milano, Longanesi, 2001.
- Medri, M., *Manuale di rilievo archeologico*, Bari, Laterza, 2003.
- Mitchell WJ., *The Logic of Architecture. Design, Computation, and Cognition*, MIT Press. Cambridge, Massachusetts. 1990.
- Quintrand P., Autran J., Florenzano M., Fregier M. e Zoller J., *La CAO en architecture*, Hermes, 1985.
- Rocco G., *Guida alla lettura degli ordini architettonici antichi, II, Lo ionico*, Napoli, 2003.
- Staab, S. e Studer, R. (Eds.), *Handbook on ontologies*, Springer Science & Business Media, 2013.

Articoli

- Akin, O. e Moustapha, H., “Strategic use of representation in architectural massing”, *Design Studies*, 2003, <http://www.andrew.cmu.edu/user/oa04/Papers/Massing.pdf>.
- Allen, J. F., “Towards a General Theory of Action and Time”, *Artificial Intelligence*, 1984, 23(2). Pp. 123-154.
- Aurnague, M., e Vieu, L., “Toward a formal representation of space in language : a commonsense reasoning aPproach”, *Workshop Spatial and temporal reasoning, International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1993. Pp. 123-158.
- Balletta, S., *Emilio Garroni tra linguistica, estetica e semiotica*, www.rifl.unical.it/index.php/rifl/article/view/260/249.
- Biagetti, M. C., “Un modello ontologico per l’integrazione delle informazioni del patrimonio culturale: CIDOC-CRM”, *JLIS Journal of Library and Information Science*, 2016, 7(3). Pp. 43-77.

- Berners-Lee T., Hendler J. E Lassila O., “The semantic Web”, *Scientific American*, 2001, 284(5). Pp34-43.
- Borst, W.N. e Akkermans, J.M., “Engineering Ontologies”, *International Journal of Human-Computer Studies*, 1997, 46(2-3). Pp. 365-406.
- Brogiolo, G.P., “Dall’analisi stratigrafica degli elevati all’archeologia dell’architettura”, *Archeologia dell’Architettura*, 1997, 2. Pp.181-184.
- Cattani, M. e Fiorini, A., “Topologia: identificazione, significato valenza nella ricerca archeologica”, *Archeologia e Calcolatori*, 2004, 15. Pp. 317-340.
- Claramunt, C. e Jiang, B., “A representation of relationships in temporal spaces”, P. Atkinson, D. Martin (eds.), *Innovations in GIS VII: GeoComputation*, 2000. Pp 41-53.
- Claramunt, C. e Jiang, B., “An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions”, *Journal of Geographycal Systems*, 2001, 3. Pp. 411-428.
- De Fusco, R., *Excursus sul rapporto tra linguistica e architettura*, <http://unina.academia.edu/httpwwwrenatodefuscoit>.
- De Fusco, R., *Semiologia architettonica in nuce*, <http://unina.academia.edu/httpwwwrenatodefuscoit>.
- De Luca, L., Veron, P. e Florenzano, M., “A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements”, *Visual Computer*, 2007, 23 (3). Pp.181-205.
- Doerr, M., Hunter, J., e Lagoze, C., “Towards a Core Ontology for Information Integration”, *Journal of Digital Information*, 2003, 4 (1).
- Doerr, M., Ore, C.-E. e Stead, S., “The CIDOC Conceptual Reference Model: A New Standard for Knowledge Sharing”, *Tutorials, Posters, Panels and Industrial Contributions at the 26th International Conference on Conceptual Modeling*, 2007, 83. Pp. 51-56.
- Dorflès, G., “Valori iconologici e semiotici in architettura”, *Op. cit*, 1969, 16.
- Egenhofer, M., “A formal definition of binary topological relationship”, *Lectures Notes in Computer Science*, 1989, 367. Pp. 457-472.
- Egenhofer, M. e Herring, J., *Categorizing binary topological relations between regions, lines, and points in geographic databases*, Technical report, Department of Surveying Engineering, 1992.
- Egenhofer, M. e Pullar, D., “Toward formal definitions of topological relations among spatial objects”, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Spatial Data Handling*, 1998. Pp. 225-241.
- Goulette, J. P., “Sémantique formelle de l’espace: APplication au raisonnement spatial qualitatif en architecture”, *Intellectica: Revue de l’Association pour la Recherche Cognitive*, 1999, (29). Pp. 9-34.
- Guarino, N., “Understanding, building and using ontologies”, *International Journal of Human-Computer Studies*, 1997, 46(2-3). Pp. 293–310.
- Guarino, N., “Formal ontology and information systems”, *Proceedings of FOIS*, 1998, 98. Pp. 81-97.
- Guarino, N., Oberle, D. e Staab, S., “What Is an Ontology?”, Staab, S. e Studer, R. (eds.), *Handbook on Ontologies, International Handbooks on Information Systems*, 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Gruben G. e Lambrinoudakis W., “Das euentdeckte Heiligtum von Iria auf Naxos”, *Archäologischer Anzeiger*, 1987, Pp. 569-621.
- Gruber, T. R., “Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing”, *International Journal Human-Computer Studies*, 1993, 43. Pp.907-928.
- Gruber, T. R., “A translation aPproach to portable ontology specifications”, *Knowledge Acquisition*, 1993, 5(2). Pp. 199-220.
- Marchetti, A., Ronzano, F., Tesconi, M. e Minutoli, M., *Formalizing Knowledge by Ontologies: OWL and KIF*, https://www.iit.cnr.it/sites/default/files/TechnicalReport_IIT_FormalizingKnowledgeByOntologies.pdf.
- Messaoudi, T., Véron, P., Halin, G. e De Luca, L., “An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state”, *Journal of Cultural Heritage*, 2008, 29, 100-112.
- Messaoudi, T., De Luca, L. e Véron, P., “Towards an Ontology for Annotating Degradation Phenomena”, *Proceedings of Digital Heritage International Congress DH'15*, 2015. Pp.1-4.
- Murphy, M., McGovern, E. e Pavia, S., “Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 76. Pp. 89-102.
- Simmons, G., “Shapes, part structures and objects concepts”, *Workshop Parts and wholes, 11° European Conference on Artificial Intelligence*, 1994.
- Spinelli, S., *Introduzione ai thesauri*, <http://web.dfc.unibo.it/buzzetti/IUcorso2008-09/mdidattici/spinelli-theauri.htm> 27/08/2018.
- Studer, R., Benjamins, R. e Fensel, D., “Knowledge engineering: Principles and methods”, *Data & Knowledge Engineering*, 1998, 25(1-2). Pp. 161-198.
- Ward Perkins, J.B. e Strong, D.E., “The temple of Castor in the Forum Romanum”, *Papers of the British School at Rome*, 1962, 30. Pp. 1-30.
- W3C, *OWL Web Ontology Language Overview*, W3C Recommendation 10 February 2004, 2004.
- W3C, *OWL 2 Web Ontology Language Primer*, W3C Recommendation 27 October 2009, 2009.

Rilievo reality-based

Testi

- Bryan, P., Blake, B. e Bedford, J., *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*, English Heritage, 2009.
- De Luca, L., *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*. Dario Flaccovio Editore, 2011.
- Guidi, G., Russo, M. e Beraldin, J., *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill Education, 2010.

- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J., *Close-Range Photogrammetry and 3D imaging*. Walter de Gruyter, 2014.
- Remondino, F., Campana, S., *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*. BAR International Series 2598, 2014.

Articoli

- Amenta, N. e Bern, M., “Surface reconstruction by Voronoi filtering”, *Discrete and Computational Geometry*, 1999, 22 (4). Pp. 481-504.
- Angelini, A. Gabrielli, R., “Laser scanning e photo-scanning. Tecniche di rilevamento per la documentazione 3D di beni architettonici ed archeologici”, *Archeologia e Calcolatori*, 2013, 24. Pp.379-394.
- Arrighetti, A. e Cavalieri, M., “Il rilievo fotogrammetrico per le nuvole di punti RGB della Sala Triabsidata di Aiano-Torraccia di Chiusi”, *Archeologia e Calcolatori*, 2012, 23. Pp.121-133.
- Bartoli, M., “Metodologie e strumenti di studio digitali per l’archeologia. Nuovi strumenti per la documentazione archeologica”, *Digitalia*, 2014, 1.
- Bernardini, F. e Rushmeier. H. “The 3D Model Acquisition Pipeline”, *Computer Graphics Forum*, 2002, 21(2). Pp. 149-172.
- Biason, A., Borgogno Mondino, E., Giulio Tonolo, F., Lingua, A. e Rinaudo, F., “Utilizzo delle tecniche della geomatica per la modellazione del territorio”, *Relazione finale del programma Interr, III A-ALCOTRA Prog. n.179 Riskydrogeo*, 2006.
- Bitelli, G., “Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali”, *Atti 6a Conferenza Nazionale ASITA*, IXXXIV, Perugia, 2002.
- Bitelli, G., Valentina, G., Remondino, F. e Vittuari L., “The potential of 3D techniques for cultural heritage object documentation”, *Proceeding of SPIE – The international Society for Optical Engineering*, 2007.
- Bosse, M., Zlot, R. e Flick, P., “Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3D Range Sensor with Application to Mobile Mapping”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28 (5).
- Bosse, M., Zlot, R. e Flick P., “Continuous 3D Scan-Matching with a Spinning 2D Laser”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- Bosse, M., Greenop, K., Jarzab, Z., Juckes, E., Roberts, J. E Zlot R., “Efficiently Capturing Large, Complex Cultural Heritage Sites with Handheld Mobile 3D Laser Mapping System”, *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15 (6).
- Brown, D.C., “Close-range camera calibration”, *PER&RS*, 1971, 37(8). Pp.855-866.
- Cazals, F. e Giesen, J., “Delaunay triangulation based surface reconstruction”, *Effective Computational Geometry for Cruves and Surfaces*, Boissonna, J. D. e Teillaud, M. (Eds), Springer-Verlag, Mathematics and Visualization, 2006. Pp. 231- 276.
- Chiabrando, F., Costamagna, E. e Spanò A., “Passive optical sensors and related image matching methods for 3D modeling”, *Territorio Italia*, 2013, 1.

- Chiabrando, F., Lingua, A., Maschio, P., Rinaudo, F. e Spanò A., “Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico”, *Atti del Convegno-Una giornata informale per i 70 anni del prof. Carlo Monti*, Politecnico di Torino, 2012.
- Curci, A. e Fiorini, A., “Il rilievo delle superfici tramite fotogrammetria 3D: dal microscavo dei complessi tombali agli scavi in open area”, *Archeologia e calcolatori*, 2013, 24. Pp. 355-370.
- Durrant-Whyte, H. e Bailey T., “Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006.
- Fiorillo, F., Remondino, F., Barba, S., Santoriello, A., De Vita, C. e Casellato, A., “3D digitization and mapping of heritage monuments and comparison with historical drawings”. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, II-5/W1.
- Gandolfi, S. e Forlani, G., “Catasto stradale, mobile mapping e navigazione geodetica nelle reti di stazioni permanenti”, *PRIN 2004: I servizi di posizionamento satellitare per l'e-government*, Cap. 6.
- Gonizzi Barsanti, S., Remondino, F. e Visintini D., “Photogrammetry and Laser Scanning for Archeological Site 3D Modeling-Some Critical Issues”, *Proc. 24th Intern.CIPA Symposium*, 2013, Strasbourg, France, 2-6 Sept. 2013.
- Gonizzi Barsanti, S., Remondino, F. e Visintini D., “3D survey and modeling of archaeological sites – some critical issues”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, II-5/W1.
- Guidi G. e Russo M., “The role of digital models in Cultural Heritage preservation”, *IX International Forum Le Vie dei Mercanti*, 2011.
- Guidi, G., “Metrological characterization of 3D imaging devices”, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013.
- Gruen, A., Remondino, F. e Zhang, L., “The Bamiyan Valley. Landscape Modeling for Cultural Heritage. Visualization and Documentation”, *Institute for Geodesy and Photogrammetry ETH*, Zurich.
- Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A. e Ercoli S., “A Multi-Resolution Methodology for the 3D Modeling of Large and Complex Archeological Areas”, *International Journal of Architectural Computing*, 2009, 1 (7). Pp.39-55.
- Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F. e Rizzi A., “3D Modeling of Large and Complex Site Using Multi-sensor Integration and Multi-resolution Data”, *The 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, Ashley, M., Hermon, S., Proenca, A. e Rodriguez- Echavarria, F. (eds), 2008.
- Guidi, G., Russo, M. e Angheluddu, D., “3D Survey and virtual reconstruction of archaeological sites”, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2014.
- Merlo, A., Fantini, F., Aliperta, A., Lavarotti, G. e Lopez Hernandez J.L., “Texturing e ottimizzazione dei modelli digitali reality-based: la chiesa della Compañía de Jesús”. *DISEGNARECON*, 2013, 12.
- Moons, T., Van Gool, L. e Vergauwen, M., “3D Reconstruction from Multiple Images, Part 1: Principles”. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2008, 4(4). Pp.287-404.

- Remondino F., “Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse”, *DISEGNARECON*, 2011, 4(8). Pp.90-98.
- Remondino F. e El-Hakim S., “Image-based Modelling: a Review”, *The photogrammetric record*, 2006, 21. Pp. 269-291.
- Remondino, F., El-Hakim, S., Gruen, A. e Zhang, L., “Turning images into 3-D models”, *Signal Processing Magazine, IEEE*, 2008, 25(4). Pp. 55-65.
- Remondino, F. e Fraser, C., “Digital camera calibration methods. Considerations and comparison”, *LAPRS, 2006*, XXXVI. Pp. 266-272.
- Sarazzi, D., Mancon, L., Julitta, F. e Quartieri, A., “Piattaforma UAV per l’acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica di immagini di scavi archeologici e strutture architettoniche”, *Atti 15° Conferenza Nazionale ASITA*, Reggio di Colorno, 15-18 novembre, 2011.
- Vico, L. e Vassallo, V., “Methodologies and techniques for the reconstruction of ancient architectures”. *Proceedings of the 38° Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, CAA2010.
- Voltini, F., Remondino, F., Pontin, M., Girardi, S., Rizzi, A. e Gonzo, L., “Integrazione di fotogrammetria e laser scanner per la documentazione di beni culturali”, *Proc. of X ASITA Conference*, Bozen, 2006.
- Vosselman G., “Design of an indoor mapping system using three 2D laser scanners and 6 DOF SLAM”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2014, II-3.
- Zlot, R., Bosse, M., Greenop, K., Jarzab, Z., Juckes, E. e Robert, J., “Efficiently capturing of large, complex Cultural Heritage sites with a handheld 3D mobile laser mapping system”, *Journal of Cultural Heritage*, 2013, 15(6). Pp. 670-678.

Processi e metodi di strutturazione semantica di modelli architettonici in una visione integrata per la loro gestione in archivi digitali

Testi

- Arvo, J., Euranto, A., Järvenpää, L., Lehtonen, T. e Knuutila, T., *3D mesh simplification. A survey of algorithms and CAD model simplification tests*, University of Turku Technical Reports, 2015, 3.
- Attene, M., *Algoritmi per la semplificazione di griglie di triangoli*, Relazione di approfondimento per il corso di Modellazione Geometrica, Università degli studi di Genova.
- Rondini, E., *Tecniche semi-automatiche per l’annotazione semantica di dati multimediali*, Tesi di Laurea in Ingegneria Informatica, Università degli Studi di Bologna Alma Mater Studiorum, 2005.
- Sheffer, A., Kraevoy, V. e Julius, D., *Shuffler: Modeling with interchangeable parts*, Technical report, Department of Computer Science, University of British Columbia, 2006, 9.

Articoli

- Algorri, M.-E. e Schmitt, F., “Mesh Simplification”, *Proceedings of the 1996 Eurographics*, 1996. Pp. 77-86.
- Alliez, P., Ucelli, G., Gotsman, C. e Attene, M., “Recent Advances in Remeshing of Surfaces”, *Shape Analysis and Structuring, Mathematics and Visualization*, 2008. Pp. 53-82.
- Álvarez, R., Noguera, J., Tortosa, L. e Zamora, A., “GNG3D - A Software Tool for Mesh Optimization Based on Neural Networks”, *International Joint Conference on Neural Networks. IEEE Computer Society*, 2006. Pp. 4005-4012.
- Álvarez, R., Noguera, J.-V., Tortosa, L. e Zamora, L., “A Mesh Optimization Algorithm Based on Neural Networks”, *Information Sciences*, 2007, 177(23). Pp. 5347-5364.
- Aspert, N., Santa-Cruz, D. e Ebrahimi, T., “MESH: Measuring Errors between Surfaces using the Hausdorff distance”, *Proceedings. IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2002. Pp. 705-708.
- Attene, M., Falcidieno, B. e Spagnuolo, M., “Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives”, *The Visual Computer*, 2006, 22(3). Pp. 181-193.
- Ballard, D. H., “Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes”, *Pattern Recognition*, 1991, 13(2). Pp. 183-194.
- Barnea, S. e Filin, S., “Segmentation of terrestrial laser scanning data using geometry and image information”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 76. Pp. 33-48.
- Benhabiles, H., Vandeborre, J.-P., Lavoué, G. e Daoudi, M., “A framework for the objective evaluation of segmentation algorithms using a ground-truth of human segmented 3Dmodels”, *Proc. IEEE Intern. Conference on Shape Modeling and Applications*, 2009. Pp. 36-43.
- Besl, P.J. e Jain, R.C., “Segmentation through variable order surface fitting”, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 10(2). Pp. 167-192.
- Brodu, N. e Lague, D., “3D Terrestrial LiDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 68. Pp.121-134.
- Chazelle, B., Dobkin, D. P., Shouraboura, N. e Tal, A., ”Strategies for polyhedral surface decomposition: an experimental study”, *Proceedings of the eleventh annual symposium on Computational geometry*, 1995. Pp. 297-305.
- Chen, X., Golovinskiy, A. e Funkhouser, T., “A Benchmark for 3D Mesh Segmentation”, *Proc. ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3).
- Chen, D., Zhang, L., Mathiopoulos, P. T. e Huang, X., “A methodology for automated segmentation and reconstruction of urban 3-D buildings from ALS point clouds”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(10). Pp. 4199-4217.
- Cignoni, P., Montani, C. e Scopigno, R., “A Comparison of Mesh Simplification Algorithms”, *Computers and Graphics*, 1997, 22. Pp. 37-54.
- Cohen, J., Varshney, A., Manocha, D., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F. e Wright, W., “Simplification Envelopes”, *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH, ACM*, 1996. Pp. 119-128.
- Cohen, J., Olano, M. e Manocha, D., “Appearance Preserving Simplification”, *Computer Graphics (Proc. Siggraph 98)*, 1998, 32. Pp. 115-122.
- Comaniciu, D. e Meer, P., “Mean shift: A robust approach toward feature space analysis”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5). Pp. 603-619.
- DeHaemer, M. J. e Zyda, M. J., “Simplification of objects rendered by polygonal approximations”, *Computers and Graphics*, 1991, 15(2). Pp. 175-184.
- Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., HoPpe, H., Lounsbery, M. e Stuetzle, W., “Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes”, *Computer Graphics (Proc. Siggraph 95)*, 1995, 29. Pp. 173-182
- Fischler, M. A. e Bolles, R. C., “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, *Communications of the ACM*, 1981, 24(6). Pp. 381-395.
- Franc, M. e Skala, V., “Fast Algorithm for Triangular Mesh Simplification Based on Vertex Decimation”, *Proceedings of the International Conference on Computational Science-Part II. ICCS '02*, 2002. Pp. 42-51.
- Fritzke, B. “A Growing Neural Gas Network Learns Topologies”, *Advances in Neural Information Processing Systems 7*, 1995. Pp. 625-632.
- Garland, M. e Heckbert, P. S., “Surface Simplification Using Quadric Error Metrics”, *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH '97*, ACM, 1997. Pp. 209-216.
- Garland, M. e Heckbert, P. S., “Simplifying Surfaces with Color and Texture using Quadric Error Metrics,” *Proc. IEEE Visualization 98, IEEE CS Press*, 1998. Pp. 263-270.
- Garland, M., Willmott, A. e Heckbert, P. S., “Hierarchical face clustering on polygonal surfaces”, *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, 2001. Pp. 49-58.
- Gelfand, N. e Guibas, L. J., “Shape segmentation using local slippage analysis”, *Proceedings of the 2004 Euro graphics/ ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, 2004. Pp. 214-223.
- Golovinskiy, A., Podolak, J. e Funkhouser, T., “Symmetry-Aware Mesh Processing”, Hancock, E. R., Martin, R. R. e Sabin, M. A. (Eds), *Mathematics of Surfaces*, 2009, 5654. Pp. 170-188.
- Gonizzi Barsanti, S., Guidi, G. e De Luca, L., “Segmentation of 3d models for cultural heritage structural analysis – some critical issues”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, IV-2/W2. Pp. 115-122
- Grilli, E., Menna, F. e Remondino, F., “A review of point clouds segmentation and classification algorithms”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-2/W3. Pp. 339-344.
- Hamann, B., “A Data Reduction Scheme for Triangulated Surfaces”, *Computer Aided Geometric Design*, 1994, 11(2). Pp. 197-214.
- He, T., Hong, L., Kaufman, A., Varshney, A. e Wang, S., “Voxel-Based Object Simplification”, *Proc. Visualization 95, IEEE CS Press*, 1995. Pp. 296-303.

- Hoppe, H., “Progressive Meshes”, *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH, ACM*, 1996. Pp. 99-108.
- Isler, V., Lau, R. W. H. e Green, M., “Real-Time Multi-Resolution Modeling for Complex Virtual Environments”, *Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1996. Pp. 11-20.
- Kalvin, A. D., Cutting, C. B., Haddad, B. e Noz, M. E., “Constructing topologically connected surfaces for the comprehensive analysis of 3D medical structures”, SPIE The International Society for Optical Engineering, 1991, 1445. Pp. 247-259.
- Karni, Z. e Gotsman, C., “Spectral compression of mesh geometry”, *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, 2000. Pp. 279-286.
- Klein, R., Liebich, G. e Straßer, W., “Mesh Reduction with Error Control”, *Proceedings of the 7th Conference on Visualization '96. VIS '96, IEEE Computer Society Press*, 1996. Pp. 311-318.
- Lavoué, G., Dupont, F. e Baskurt, A., “A new cad meshes segmentation method, based on curvature tensor analysis”, *Computer-Aided Design*, 2005, 37(10). Pp. :975-987.
- LeCun, Y., Bengio, Y. e Hinton, G., “Deep learning”, *Nature*, 2015, 521. Pp. 436-444.
- Lee, C. H., Varshney, A. e Jacobs, D. W., “Mesh Saliency”, *ACM SIGGRAPH 2005*. Pp. 659-666.
- Lindstrom, P., Koller, D., Ribarsky, W., Hodges, L. F., Faust, N. e Turner, G., “Real-Time, Continuous Level of Detail Rendering of Height Fields”, *Computer Graphics (Proc. Siggraph 96)*, 1996, 30. Pp. 109-118.
- Lindstrom, P. e Turk, G., “Fast and Memory Efficient Polygonal Simplification”, *Proceedings of the Conference on Visualization, IEEE Computer Society Press*, 1998. Pp. 279-286.
- Lindstrom, P. e Turk, G., “Image-driven Simplification”, *ACM Trans. Graph.*, 2000, 19(3). Pp. 204-241.
- Low, K-L e Tan, T-S., “Model Simplification Using Vertexclustering”, *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, I3D, ACM*, 1997. Pp. 75-82.
- Lloud, S., “Least square quantization in pcm”, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, 28. Pp. 129-137.
- Luebke, D. P. e Erikson, C., “View-Dependent Simplification of Arbitrary Polygonal Environments,” *Computer Graphics (Proc. Siggraph 97)*, 1997, 31. Pp. 199-208.
- Luebke, D. P., “A developer’s survey of polygonal simplification algorithms”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, may/june. Pp. 24-35.
- MacQueen, J., “Some methods for classification and analysis of multivariate observations”, *Proc. 5th Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, 1967, 1. Pp. 281-297.
- Manferdini, A. M. e Remondino, F., “Reality-Based 3D Modeling, Segmentation and Web-Based Visualitation”, M. Ioannides (Ed.), *EuroMed* 2010, 6436. Pp. 110-124.
- Mangan, A. P. e Whitaker, R. T., “Surface segmentation using morphological watersheds”, *Proc. IEEE Visualization*, 1998.
- Mangan, A. P. e Whitaker, R. T., “Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation”, *IEEE*

- Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999, 5(4). Pp. 308-321.
- Meyer, M., Desburn. M., Schröder, P. e Barr, A. H., “Discrete differential - geometry operators for triangulated 2-manifolds”, *Proceedings VisMath '02*, 2002, III. Pp. 35-57.
- Nan, Li, Pengdong, G., Yongquan, L., Ameng, L. e Wenhua, Y., “A New Adaptive Mesh Simplification Method Using Vertex Clustering with Topology and Detail Preserving”, *Proceedings of the 2008 International Symposium on Information Science and Engineering, IEEE Computer Society*, 2008, 1. Pp. 150-153.
- Ng, R. T. e Han, J., “Efficient and effective clustering methods for spatial data mining”, *Proc. 20th Int. Conference on Very Large Databases*, 1994. Pp. 144-155.
- Nguyen, A. e Bac Le, “3D Point Cloud Segmentation: A survey”, *Proc. IEEE 6th International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2013. Pp. 225-230.
- Ovreiu, E., Valette, S., Buzuloiu, V. e Prost, R., “Mesh simplification using an accurate measured quadratic error”, *10th International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), IEEE Computer Society*, 2011. Pp. 1-4.
- Pengdong, G., Ameng. L., Yongquan, Jintao, W., Nan, L. e Wenhua, Y., “Adaptive Mesh Simplification Using Vertex Clustering with Topology Preserving”, *Computer Science and Software Engineering, IEEE*, 2008. Pp. 971-974.
- Popovic, J. e HoPpe, H., “Progressive simplicial complexes”, *ACM Computer Graphics Proc., Annual Conference Series, (Siggraph '97)*, 1997. Pp. 217-224.
- Poux F., Hallot P., Neuville R. e Billen, R., “Smart point cloud: definition and remaining challenge”, *Proc. 11th 3D Geoinfo Conference*, 2016, IV-2/W1. Pp. 119-127.
- Rabbani, T., Van Den Heuvel, F. e Vosselmann, G., “Segmentation of point clouds using smoothness constraint”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, 36(5). Pp. 248-253.
- Rashad, M., Khamiss, M. e Mousa, M., “A Review on Mesh Segmentation Techniques”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2017, 6(8). Pp. 18-26.
- Ronfard, R. e Rossignac, J., “Full-range Approximation of Triangulated Polyhedra”, *Computer Graphics Forum*, 1996, 15(3). Pp. 67-76.
- Rossignac, J. e Borrel, P., “Multi-Resolution 3D Approximations for Rendering Complex Scenes,” *Geometric Modeling in Computer Graphics*, 1993. Pp. 455-465.
- SaPpa, A. D. e Devy, M., “Fast range image segmentation by an edge detection strategy”, *Proc. IEEE 3rd 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001. Pp. 292-299.
- Schnabel, R., Degener, P. e Klein, R., “Completion and reconstruction with primitive shapes”, *CGF Eurographics*, 2009, 28(2). Pp. 503-512.
- Schroeder, W. J., Zarge, J. A. e Lorensen, W. E., “Decimation of Triangle Meshes”, *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH '92, ACM*, 1992. Pp. 65-70.
- Schroeder, W. J., “A Topology Modifying Progressive Decimation Algorithm”, *Proceedings of the 8th*

Conference on Visualization '97. VIS '97, IEEE Computer Society Press, 1997. Pp. 205-214.

- Shamir, A., “A survey on mesh segmentation techniques”, *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(6). Pp. 1539-1556.
- Sun, Y., Page, D. L., Paik, J. K., Koschan, A. e Abidi, M. A., “Triangle mesh-based edge detection and its application to surface segmentation and adaptive surface smoothing”, *Proceedings of the International Conference on Image Processing ICIP02*, 2002, III. Pp. 825-828.
- Tiangiang, L., Vladimir, G. K. E Funkhouser, T., “Finding Surface Correspondances Using Symmetry Axis Curves”, *Journal Computer Graphics Forum*, 2012, 31(5). Pp. 1607-1616.
- Turk, G., “Re-tiling Polygonal Surfaces”, *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH '92, ACM*, 1992. Pp. 55-64.
- Vosselman, M.G., Gorte, B.G.H., Sithole, G. e Rabbani, T., “Recognising structure in laser scanning point clouds”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, 36(8/W2).
- Wani, M. A. e Arabnia, H. R., “Parallel edge-region-based segmentation algorithm targeted at reconfigurable multiring network”, *The Journal of Supercomputing*, 2003, 25(1). Pp. 43-62.
- Weinmann, M., Jutzi, B. e Mallet, C., “Feature relevance assessment for the semantic interpretation of 3d point cloud data”, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, II(5-W2). Pp. 313-318.
- Weinmann, M., Schmidt, A., Mallet, C., Hinz, S., Rottensteiner, F. e Jutzi, B., “Contextual classification of point cloud data by exploiting individual 3D neighbourhoods”, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, II(3-W4). Pp. 271-278.
- Weiqun, C., Hujun, B. e Qunsheng, P., “An Algorithm for LOD by Merging Near Coplanar Faces Based on Gauss Sphere”, *Journal Computer Science and Technology*, 2001, 16(5). Pp. 450-457.
- Xia, J. C., El-Sana, J. e Varshney, A., “Adaptive Real-Time Level-of-Detail-Based Rendering for Polygonal Models”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1997, 3(2). Pp. 171-183.
- Xiao, J., Zhang, J., Adler, B., Zhang, H. e Zhang, J., “Three-dimensional point cloud plane segmentation in both structured and unstructured environments”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61. Pp. 1641-1652.
- Yamauchi, H., Lee, S., Lee, Y., Ohtake, Y., Belyaev, A. e Seidel, H. P., “Feature sensitive mesh segmentation with mean shift, *Proc. IEEE Shape Modeling and Applications International Conference*, 2005. Pp. 236-243.
- Zhang, E. e Turk, G., “Visibility-guided Simplification”, *Proceedings of the Conference on Visualization '02. VIS '02, IEEE Computer Society*, 2002. Pp. 267-274.
- Zhigeng, P., Jiaoying, S. e Kun, Z., “A New Mesh Simplification Algorithm Based on Triangle Collapses”, *Journal of Computer Science and Technology*, 2011, 16(1). Pp. 57-63.
- Zhou, K., Synder, J., Guo, B. e Shum, H.-Y., “Isocharts: stretch-driven mesh parameterization using spectral analysis”, *SGP '04: Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, 2004. Pp. 45-54.

- Zuckerberger, E., Tal, A. e Shlafman, S., “Polyhedral surface decomposition with applications”, *Computers & Graphics*, 2002, 26(5). Pp. 733-743.

FORMALIZZAZIONE E SPERIMENTAZIONE DEL PROTOCOLLO DI ANNOTAZIONE SEMANTICA

Certose e cenobio di San Lorenzo in Padula

Testi

- Amabile, F., *La Certosa di Padula*, Tip. Santos Cantelmi Salerno,1964.
- *Arte nelle certose dell'Italia meridionale celebrazioni per il VII centenario Certosa di San Lorenzo Padula*, Soprintendente Arch. Giuseppe Zampino: Paparo Edizioni, Napoli.
- Bosi, R., *Monasteri italiani*, guida turistica, Edizioni Calderini s.r.l., 1992.
- *Campania, Napoli, Caserta, Benevento,Ischia, Pompei, la Costiera, il Vesuvio, il Cilento, Capri*, Touring Club Italiano, Touring Editore, 2011.
- Casella, M., *La Certosa di Padula in età contemporanea (1866-1960)*, Laveglia Editori, Battipaglia, 2007.
- *Certosa di San Lorenzo Padula guida breve 2006*, Ministero per i Beni e le Attività Culturali Direzione Generale per la Valorizzazione del Patrimonio Culturale Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici di Salerno e Avellino: Ed Gennaro Miccio e Eufemia Anna Baratta.
- de Cunzo, M. e de Martini, V., *La Certosa di Padula*, Soprintendenza per i Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici di Salerno e Avellino, 2006.
- Giudice, E., *La Certosa di San Lorenzo di Padula*, Laveglia, Salerno, 2002.
- *La certosa di Padula, guida alla visita*, schede informative, Padula, Comune di Padula , 19.
- *La Certosa di San Lorenzo a Padula*, Electa Napoli.
- *La Certosa Sotterranea Padula*, Certosa di San Lorenzo, 10 agosto-10 ottobre 1992 Pubblicazione Napoli : Fausto Fiorentino, 1992.
- Lapadula, G., *La Certosa di San Lorenzo*, Matonti Editore.
- Pesce, C., *Il Vallo di Diano e la Certosa di Padula*, Carlo Pesce Edizione, Pubblicazione Lagonegro: tip. Lucana di F. Auleta, 1916.
- Pica, D., *La Certosa di Padula nella storia e nell'arte*, Salerno, 1969.
- Pica, L., *Padula e la sua Certosa*, Edizioni Cantelmi, Salerno, 1971.
- Restaino, C., *Le tarsie lignee della Certosa di Padula Rapporti tra immagini e testi nel coro dei padri*, 2010.

- Sacco, A., *La certosa di Padula / disegnata, descritta e narrata su documenti inediti dal prof. Antonio Sacco, con speciale riguardo alla topografia, alla storia e all'arte della contrada*, Roma :Tip. della'Unione editrice; poi Grafia Industrie grafiche , 1914-1930.
- Schiavo, A., *Opere architettoniche nella Certosa di Padula*, 1941.
- *Settimana della cultura 16-25 aprile 2010*, Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Campania Soprintendenza per i Beni Storici, Artistici ed Etnoantropologicidi Salerno e Avellino.
- *Un itinerario nella natura e nella storia*, Culturalia. Pp. 1-41.

Articoli

- Carlomagno, P., “Padula, Il Complesso Monumentale della Certosa”, *La Provincia di Salerno*, Edizioni dell'Ippogrifo.
- Certosa San Lorenzo, *L'arte in Campania , Campania Artecord*. P. 75.
- Itinerari Cilento, *Touring Club Italiano*, Touring Editore, 2005.
- Sacco, A., “La Certosa di San Lorenzo” , *Guida Parco*, 2005.
- Teobaldo, F., “La Certosa di San Lorenzo”, *Campania Felix speciale Provincia di Salerno*, Altrastampa Edizioni, 2005.
- Vitolo, G., Aspetti e problemi della storia delle certose nel Mezzogiorno medievale: gli esempi di Napoli e Padula, *Napoli nobilissima*, 2001, 5.Ser. 2, 1/4. Pp. 5-14.

Mappatura semantica e integrazione del corpus informativo in sistemi informatici informativi

Testi

- Guerra, L., *Un metodo multilivello per la semplificazione di mesh poligonali da scanner 3D*, Tesi di Laurea in Fondamenti di Computer Graphics, Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, 2012.
- Jurafsky, D. e Martin, J. H., *Speech and Language Processing: an introduction to natural language processing, computational linguistics and speech recognition*, Pearson Education, 2008.
- Liddy, E. D., *Natural language processing, Encyclopedia of Library and Information Science*, seconda edizione, NY. Marcel Decker, Inc., 2001.
- McNeill, D., *Hand and Mind*, Chicago Press, 1992.
- Mullen, T., *Mastering Blender*, SYBEX Inc., Alameda, CA, USA, seconda edizione, 2012.
- Murdock, K. L., *3Ds Max Bible*, Wiley Publishing, edizione dvd, 2008.
- Nystrom, R., *Game Programming Patterns*, Genever Benning, 2014.

Articoli

- Cassell, J. A., “Framework for gesture generation and interpretation”, *Computer Vision in Human-Machine Interaction*, 1998. Pp. 191-215.
- Chowdhury, G. G., “Natural language processing”, *Annual Review of Information Science and Technology*, 2003, 37 (1). Pp. 51-89.
- Dumas, B., Lalanne, D. e Oviatt, L. S., “Multimodal interfaces: A survey of principles, models and frameworks”, *Human Machine Interaction*, 2009. Pp. 3-26.
- Eisenstein, J. e Davis, R., “Visual and linguistic information in gesture classification”, *Proceedings of the 6th International conference on Multimodal interfaces*, 2004. Pp. 113-120.
- Held, G. e Marshall, T., “Data Compression; Techniques and Applications: Hardware and Software Considerations”, Wiley, J. e Sons, Inc., 1991, New York, NY, USA, terza edizione.
- Huffman, D. A., “A method for the construction of minimumredundancy codes”, *Proceedings of the IRE*, 1952, 40(9). Pp. 1098-1101.
- Lieven, E., Tomasello, M., Matthews, D. e Behne, T., “Origins of the human pointing gesture: a training study”, *Developmental Science*, 1998, 15 (6). Pp. 817-829.
- Lison, P. e Kennington, C., “A hybrid approach to dialogue management based on probabilistic rules”, *Computer Speech and Language*, 2015, 34 (1).
- Lison, P. e Kennington, C., “Opendial: A toolkit for developing spoken dialogue systems with probabilistic rules”, *ACL*, 2016.
- Origlia, A., Paci, G. e Cutugno, F., “Mwn-e: a graph database to merge morpho-syntactic and honological data for italian”, *Proceedings. of Subsidia*, 2017, in attesa di pubblicazione.
- Sanders, A. “An Introduction to Unreal Engine 4”, Peters, A. K., Ltd., Natick, MA, USA, 2016.

SITOGRAFIA

- <http://infogrid.org/trac/wiki/Reference/PidcockArticle>
- <http://eurovoc.europa.eu/drupal/?q=it/node/871>
- <https://keet.wordpress.com/2017/01/20/on-that-shared-conceptualization-and-other-definitions-of-an-ontology/>
- <http://www.intelligenzaartificiale.it/web-semantico/>
- <http://nevit-notes.blogspot.com/2011/04/uri-url-e-urn.html>
- <http://www.livesalerno.com/it/certosa-di-padula>
- <http://www.polomusealecampania.beniculturali.it/index.php/la-certosa-padula>

- http://www.culturaitalia.it/opencms/museid/viewItem.jsp?language=it&case=&id=oai%3Aculturaitalia.it%3Amuseiditalia-mus_469
- <http://www.valloweb.com/certosa/>
- <http://ambiente.sabeniculturali.it/BAP/?q=luoghi&luogo=Monumenti&provincia=&comune=&src=san%20lorenzo&ID=43>
- http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MiBAC/sito-MiBAC/Luogo/MibacUnif/Luoghi-della-Cultura/visualizza_asset.html?id=155601&pagename=157031
- http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MiBAC/sito-MiBAC/Luogo/MibacUnif/Luoghi-della-Cultura/visualizza_asset.html?id=155601&pagename=157031
- http://www.beniculturali.it/mibac/opencms/MiBAC/sito-MiBAC/Luogo/MibacUnif/Luoghi-della-Cultura/visualizza_asset.html?id=155601&pagename=157031

TESI DI DOTTORATO

- Chih-Hao Yu, *Semantic Annotation Services for 3D Models of Cultural Heritage Artefacts*, Tesi di dottorato in Tecnologia delle Informazioni e Ingegneria Elettrica, Università di Queensland, Australia, 2014, disponibile presso <https://espace.library.uq.edu.au/>.
- Dalli Cardillo, G., *Sistemi di rappresentazione ed anastilosi virtuale del tempio di Castore e Polluce di Agrigento*, Tesi di dottorato in Rilievo e RaPpresentazione, Università degli Studi di Palermo, 2011.
- De Luca, L., *Relevè e et multi-représentations du patrimoine architectural Définition d'une aPproche hybride pour la reconstruction 3D d'edices*, Tesi di Dottorato in Conception, Sciences de l'Homme et Socièetèe, Arts et Metiers, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre d'Aix-en-provence, 2006.
- Farella, Elisa Mariarosaria, *Lo spazio virtuale del passato. Documentazione, modellazione e fruizione del patrimonio archeologico. Il Parco Archeologico di Pausilypon*, Tesi di dottorato in Architettura, Università degli Studi di Napoli, 2017.
- Messaoudi, T., *Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti*, Tesi di Dottorato in Conception École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - ENSAM, 2017.
- Niang, C.A.T., *Vers plus d'automatisation dans la construction de systèmes mediateurs pour le web semantique : une aPplication des logiques de description*, Tesi di dottorato in Informatica, École doctorale Mathématiques, Informatique, Physique Théorique et Ingénierie des Systèmes (Centre-Val de Loire), Tours, 2013.
- Sapkota, P. P., *Segmentation of Coloured Point Cloud Data*, Tesi di Dottorato, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 2008.
- Zanni, S., *La villa dei Volusii Saturnini a Lucus Feroniae: ambienti virtuali per la ricerca archeologica*, Tesi di dottorato in Ricerca in Antichistica Curriculum Storico-Archeologico, Università degli Studi di Milano, 2013.



Valeria Cera si laurea nel 2015, con lode e dignità di pubblicazione, in Architettura presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, con una tesi in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura dal titolo *Il rilievo strumentale per il recupero dei Beni Culturali: workflow per il processo di conoscenza di Villa Livia*. Dal 2016 è cultrice della materia nel settore delle discipline della Rappresentazione del Dipartimento di Architettura di Napoli.

